

科学技術動向

2003

2

No.23

科学技術トピックス

▶ ライフサイエンス分野

- ①細胞移植による糖尿病の治療
- ②学習記憶に関わるシナプスの動態が明らかにされた

▶ 情報通信分野

- ①ガラス基板上に LSI システムを形成する技術が開発される

▶ ナノテク・材料分野

- ①超高密度光記録用レーザー開発につながる新型窒化ホウ素が合成される

▶ エネルギー分野

- ①燃料電池などに適用できる耐熱性を有するプロトン導電膜が開発される

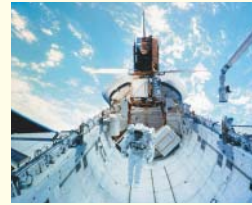
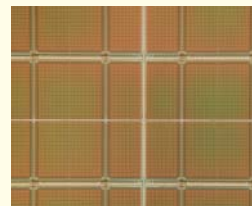
▶ 製造技術分野

- ①半導体製造技術開発で産学官プロジェクトが協力拡大

特集 1 「脳科学と教育」 研究の動向

特集 2 燃料電池自動車普及の鍵を握る水素貯蔵材料

特集 3 2004 年度米国大統領予算教書に見る R&D プライオリティの変化



科学技術トピックス

ライフサイエンス分野

4

①細胞移植による糖尿病の治療

2002年10月にミニシンポジウム「細胞移植による糖尿病の治療」が京都市リサーチパークで開催された。脳死ドナーからの膵臓の一部（インスリンを分泌するランゲルハンス島）の移植によるⅠ型糖尿病の治療成績が向上したことや、胚性幹細胞（ES細胞）や体性幹細胞からインスリン分泌細胞が分化誘導出来たことなどが報告された。細胞移植によるⅠ型糖尿病治療への期待が高まっており、今後の動向が注目される。

②学習記憶に関わるシナプスの動態が明らかにされた

「記憶や学習など外的刺激で、成体（人）の脳中のシナプスは変化するか」との問いに答える研究が発表された。緑色蛍光タンパク質（GFP）がニューロンに発現するトランスジェニックマウスを作成し、外的刺激により成体マウス脳内にあるニューロンのシナプス形成が影響を受けるかどうかを、共焦点レーザー顕微鏡により観察した。その結果、新しい環境に置かれたマウスの脳内ニューロンのシナプス消失および形成は、放置後わずか数日で生じることが示された。このことは、外界刺激が成体（人）の脳内のシナプスに影響を与えることを示唆しており、本研究は学習・記憶のメカニズムを解明する糸口を与えた。

情報通信分野

5

①ガラス基板上にLSIシステムを形成する技術が開発される

これまで単結晶シリコン上でしか実現できなかった高速・高密度のLSIシステムをガラス基板上に形成する技術が相次いで発表されている。今後、一枚のガラスもしくは他のフレキシブルな基板上に表示素子等を含めLSIシステムが一体形成する事が可能となれば、コンピュータやテレビをフレキシブルなシート状に作製し、紙の様に折りたたんで自由に持ち歩く事も将来的には実現する可能性がある。

ナノテク・材料分野

5

①超高密度光記録用レーザー開発につながる新型窒化ホウ素が合成される

（独）物質・材料研究機構物質研究所の小松主幹研究員らは、紫外領域で室温発光する新しい結晶構造の窒化ホウ素の合成に成功した。紫外領域で鋭い発光ピーク（発光波長領域が狭い）を示す特性がある。今回合成された新型窒化ホウ素は粉体試料の形であるが、今後、薄膜化し半導体レーザー（短波長紫外レーザー）の開発へ進めば、超高密度の光記録素子などへの応用が広がると期待される。

エネルギー分野

6

①燃料電池などに適用できる耐熱性を有するプロトン導電膜が開発される

燃料電池に用いられるプロトン導電膜（水素イオンのみを通過させる膜）は素材が有機高分子であったため、高温下（約80度超）での使用は難しかった。このほど（独）産業技術総合研究所らの研究グループは、基材に無機化合物を用いることで耐熱性（約120℃）・耐有機溶剤性を持たせ、高いプロトン導電性を示す膜を開発した。これを用いた燃料電池は、これまでより大幅に高い温度で作動できる。つまり排熱を外部のシステムの熱源として利用できるため、総合的にみた燃料電池のエネルギー効率の向上が期待される。

製造技術分野

6

①半導体製造技術開発で産学官プロジェクトが協力拡大

半導体製造技術に関する次世代技術の共同研究プロジェクトのうち、「あすかプロジェクト」と「半導体MIRAIプロジェクト」とが、製造技術分野の研究開発において協力を拡大する。あらたに研究協力を始める技術分野としては、シリコンウエハへのイオン注入技術、フォトマスク(回路基板)の欠陥検査技術、ウエハへの絶縁膜の形成・評価技術の三つが対象となる。産学官連携による各プロジェクトも、協力拡大によりいっそうの研究効率向上が望まれている。

特集—1

「脳科学と教育」研究の動向 — 7

脳科学研究の新しい戦略目標である「脳を育む」が、「ライフサイエンスに関する研究開発の推進方策について」（文部科学省科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会、2002年6月）で提案された。「脳を育む」では、乳幼児から青年期までの脳発達の解明とその教育への応用や、成人、高齢者の学習機能の解明を目指すことを目標としている。また文部科学省では、2002年3月より「脳科学と教育」研究に関する検討会を設置し、この領域の具体的な施策を検討しているところである。

「脳科学と教育」研究は国際的にも始まったばかりの新領域である。この領域は多くの異分野を架橋・融合したものであり、各分野の連携が重要となる。特に、これまでほとんど接触のなかった育児・教育の専門家と脳科学・医学研究者との対話が欠かせない。

「脳科学と教育」研究を進める上では、脳の学習や記憶といった高次脳機能についての理解を深めるため、これまで進められてきている他の脳科学研究との連携が必要である。このような連携に脳機能計測法の発達が加わることで、「脳科学と教育」研究のブレークスルーにつながると考えられることから、自然な環境下で非侵襲的に高次脳機能の動態イメージングができる手法や、脳の表面だけでなく、例えば記憶に重要な役割を果たしている海馬のような脳の内部についても簡便に計測できるような新たな技術開発に向けた施策が必要である。

また、教育の問題は社会的影響が大きく、かつ仮説の検証に時間を要する。したがって、感受期と学習との関係といった基礎的な研究成果を教育へ応用する際には、体系的な計画に基づいた大規模な縦断的研究とそれに基づく統計解析などを行った上で結論を出す必要がある。

特集—2

**燃料電池自動車普及の鍵を握る
水素貯蔵材料**

— 13

日米欧で燃料電池自動車の実証プロジェクトが相次いで始まっている。自動車産業は、我が国が世界をリードする技術競争力を有する分野の一つであり、我が国が燃料電池自動車開発で世界のリーダーシップをとることは、日本が地球環境保全の先頭に立って国際貢献するというだけでなく、日本の産業競争力を維持発展させる上でも大きな意義がある。

2002年12月2日に水素を燃料とした燃料電池自動車の第1号車が政府によって購入された。燃料電池自動車を普及させていくためには、走行持続距離をガソリン車並みに伸ばす必要があり、そのためには燃料である水素を軽量コンパクトに搭載する水素貯蔵装置が求められる。またインフラとして水素供給ステーションが整備される必要がある。これらには何れも水素を一時的に貯蔵し、必要な時に必要な量の水素を適切なスピードで安定的にかつ安全に供給する能力を備えた、実用的かつ経済的な水素貯蔵技術が求められる。

水素貯蔵技術は、圧縮ガスや液体水素方式が先行しているが、自動車への適用を想定した場合、何れの技術も十分に成熟しているとはいえない。圧縮ガスでは、カーボン繊維強化プラスチック複合材料で耐圧強化したアルミニウム製の軽量水素燃料タンクが開発されており、より高压化が検討されている。液体水素貯蔵タンクでは、低温材料開発と断熱構造設計の検討が進められている。また、水素吸蔵合金は、軽量化、耐久性や反応熱のハンドリング等に関してブレークスルーが求められている。炭素系材料や化学系水素化物材料は比較的新しい材料であり、革新的な水素貯蔵材料の発見・製造にナノテクノロジーの果たす役割が期待される。

水素燃料電池自動車が、究極のクリーン自動車として、水素エネルギーシステム実現の橋渡し役となるためには、水素貯蔵技術がキーテクノロジーであり、水素貯蔵材料の研究開発に積極的に取り組んでいくべきである。

特集—3

**2004年度米国大統領予算教書に見る
R&D プライオリティの変化**

— 24

2003年2月3日、Bush米大統領が2004年度の予算教書を発表した。連邦政府全体のR&D予算は1227億ドル、対前年比6.7%増である。

イラク情勢が緊迫の度を増す中で発表された本教書では、ディフェンス開発予算が大幅に伸びた。DOD、特に、武器システム開発予算の伸びが22%増と顕著である。新設されたDHSのR&D予算は、HSARPA（Homeland Security Advanced Research Projects Agency）の新規計上の影響で対前年比31.5%増となった。

また、予算倍増キャンペーン終了にともないNIH予算の増加率が2%に留まる一方、物理・コンピュータサイエンス等のプログラムへ配分されるDOE予算が8.1%の増加を示し、ライフサイエンス重視から数学・物理重視への変化が認められる。

今後予算教書は議会へ送られるが、スペースシャトル事故やイラク情勢の影響、議員のライフサイエンス重視支持の可能性などから、最終的にどのような歳出予算法案となるのかは非常に予測が難しい。

科学技術 トピックス

以下は科学技術専門家ネットワークにおける専門調査員の投稿（2月号は2003年1月11日より2003年2月7日まで）を中心に「科学技術トピックス」としてまとめたものです。センターにおいて、関連する複数の投稿をまとめ、また必要な情報を付加する等独自に編集するため、原則として投稿者の氏名は掲載いたしません。ただし、投稿をそのまま掲載する場合は、投稿者のご了解を得て、記名により掲載しています。

ライフサイエンス分野

①細胞移植による 糖尿病の治療

京都大学再生研の岩田博夫氏、奈良県立医大の中島祥介氏らを世話人として2002年10月26日にミニシンポジウム「細胞移植による糖尿病の治療」が京都リサーチパークで開催され、5件の報告がなされた。

カナダのアルバータ大学の金達也氏は、脳死ドナーからの膵臓の一部（インスリンを分泌するランゲルハンス島細胞）を、カテーテルを用いてⅠ型糖尿病^①患者の肝臓内に経門脈で体重1 kg当たり10,000個以上になるよう移植したところ、1年間インスリン投与を必要としない者の割合が80%、2年間インスリン投与を必要としない者の割合は53%であったこと、さらに米国、カナダ10施設での同一プロトコルによる結果がまもなくまとまると報告した。

また、大阪大学大学院医学系研究科の宮崎純一氏により、マウス胚性幹細胞（ES細胞）からのインスリン分泌細胞誘導研究の現状が報告された。

このような、脳死ドナーからの膵臓の一部の移植によるⅠ型糖尿病の治療成績が向上したことや、

胚性幹細胞（ES細胞）や体性幹細胞からインスリン分泌細胞が分化誘導出来たとの報告等により、細胞移植によるⅠ型糖尿病治療への期待が高まっており、今後の動向が注目される。

（株クラレ 柴谷 享一郎氏）

②学習記憶に関わるシナプスの動態が明らかにされた

「記憶や学習など外的刺激で、成体（人）の脳中のシナプス^②は変化するか」との問いに答え得る画期的な研究が、米国コールドスプリングハーバー研究所のSvoboda博士等により発表された（Nature、

420, 788 - 794, 2002）。

生きたまま、生体脳のニューロン^③およびシナプスの形態を観察することは、長年の夢であり、最近の共焦点レーザー顕微鏡^④の開発によりそれが可能となった。

Svoboda博士等は、まず緑色蛍光タンパク質（GFP）がニューロンに発現するトランスジェニックマウス（遺伝子導入マウス）を作成した。そして成体マウスの頬ひげの一部分を切断し、マウスが頬ひげから外界の情報を受け取る脳の領域のニューロンの変化を、緑色蛍光を指標にして、共焦点レーザー顕微鏡による経時的な観察をおこなった。

マウスを未知の環境に放置して

用語説明

①Ⅰ型糖尿病

インスリン依存型糖尿病。膵臓のランゲルハンス島のベータ細胞が自己免疫によって破壊されることで発病する。インスリンを補う治療法として、毎日数回インスリン注射を続けるか、脳死膵臓移植や膵臓の一部（インスリンを分泌するランゲルハンス島）の移植を受ける方法がある。なお、わが国の糖尿病患者の99%を占めるⅡ型糖尿病（インスリン非依存型）とは原因も治療法も異なる。

②シナプス

ニューロンとニューロンの接合部であり、刺激を伝達する。

③ニューロン

脳内にある神経細胞であり刺激を伝達する。

④共焦点レーザー顕微鏡

共焦点光学系を用いたレーザー走査顕微鏡。焦点面以外からの光を通さないため、通常の光学顕微鏡のように像がぼやけることがない。（「日経バイオ最新用語辞典」第5版より）

観察をすると、脳内ニューロンのシナプスの総数は安定していたが、数日あるいはもっと短いサイクルでシナプスの消失および新しいシナプスの形成が生じている事

が明らかにされた。この結果は、新しい環境という外界刺激でシナプスに変化することを示唆した。

学習記憶が外界刺激依存的に起きることを考え合わせると、シナ

プスの可塑的变化は学習記憶を司る基本的メカニズムであることが本研究により示唆された。

(財)東京都医学研究機構 市川 眞澄氏)

情報通信分野

①ガラス基板上に LSI システムを形成する技術が開発される

論理回路とメモリ、通信などの周辺デバイスを含むシステムを1つのLSIチップに集積するシステム・オン・チップ (System-on-Chip: SoC) の実現について、研究開発が盛んに続けられている。これは単結晶シリコン基板上にLSIを形成する従来の製造技術の延長であるが、このようなシステムが単結晶シリコン以外のガラスもしくはその他のフレキシブルな基板上へも自由に搭載できる様になると、格段にその用途が広がる。

これまでガラス上にLSIシステムを形成する技術 (System-on-Glass: SoG) は、ガラス基板上に形成される薄膜トランジスタ (Thin Film Transistor: TFT) の特性

や品質から SoC に比べて低速・低密度の用途として、例えば液晶表示素子を駆動するトランジスタとして実現されるに留まっていた。

昨年10月、シャープと半導体エネルギー研究所は、連続粒界 (Continuous Grain) シリコンと呼ばれる技術を開発し、ガラス基板上のTFTの特性を単結晶シリコンに迫る (従来の多結晶シリコンTFT比3倍) までに改善することでZ-80マイコンをガラス上に世界で最初に作製したと発表した。一方、セイコーエプソンからも昨年12月に広島で開催されたディスプレイに関する国際ワークショップ (International Display Workshop'02) において“Thin Film

Transistor Standard Cells” というタイトルで講演がなされ、ガラス基板上にセルベースのデザイン法^①を用いて、27種類のTFTからなる128ビットSRAMと4ビット算術論理演算ユニット (Arithmetic and Logical Unit: ALU) を実現する技術が紹介されている。

ガラスやフレキシブルな基板上に表示素子を含めLSIシステムを一体形成する事が可能となれば、実装面積や外付け部品の削減により、機器のさらなる軽量・省電力化が可能となる。コンピュータやテレビをフレキシブルなシート状に作製し、紙の様に折りたたんで自由に持ち歩く事も将来的には実現する可能性がある。

用語説明

①セルベースのデザイン法

複数のトランジスタから構成されるセルと呼ばれる論理回路を基本に、このセルを組み合わせてシステムを設計する LSI 設計手法。

ナノテク・材料分野

①超高密度光記録用レーザー開発につながる新型窒化ホウ素が合成される

(独)物質・材料研究機構物質研究所の小松主幹研究員らは、レーザーで発生した結晶の萌芽的な核をプラズマのかたまりの中で成長させる新しい手法 (プラズマパケット支援レーザーアブレーション法) を用い、紫外領域 (225nm) で室温発光する新しい結晶構造の

窒化ホウ素 (sp^3 結合性BN^①) の合成に成功した (Applied Physics Letters 2002年12月9日号)。波長200nm以下では、大気中の酸素や水分が紫外線により光化学反応し、オゾンなどが発生するため、波長225nmは一般用途の紫外領域として下限である。

sp^3 結合性BNは、紫外発光素子に必要な微量不純物元素の添加が容易であるが、結晶の欠陥が多く発光が広い波長域に広がりすぎることで、超高圧合成プロセスが必要

であることなど、電子材料としての実用化には克服すべき多くの課題がある。今回の新手法によって、結晶粒の大きさが従来のナノメートル程度からマイクロメートル程度へと1000倍近く改善され、結晶欠陥が大幅に減少した。このた

用語説明

① sp^3 結合性BN

ダイヤモンドと同じ化学結合状態を持ち、ダイヤモンドの次に硬い窒化ホウ素。

め鋭い発光ピーク（発光が狭い波長域に集中）が得られたものである。さらに、超高圧合成プロセスも用いていない。

現在、粉体試料として紫外領域での室温発光が確認された段階で

ある。素子化に向けては、薄膜の作製が不可欠である。これについて小松主幹研究員らは、「薄膜化の機構は、気相での萌芽的な核の成長と基板上での薄膜成長の合わせた従来の機構とは異なるかも知

れないが、現在の実験系で薄膜化が可能である」との見解を示した。

今回合成された新型窒化ホウ素による素子化が進めば、超高密度の光記録素子や超微細光レーザ・メスなどが実現する。

エネルギー分野

①燃料電池などに適用できる耐熱性を有するプロトン導電膜が開発される

プロトン導電膜は、固体高分子形燃料電池（PEFC）などに用いられているが、通常、用いられる膜は素材が有機高分子であるため、高温下（約80度超）での使用は難しかった。

こうした中、（独）産業技術総合研究所（独）ニューガラスフォーラムおよび姫路工業大学は、耐熱性・耐有機溶剤性を有するプロトン導電膜^①を開発したと発表した。

今回開発されたプロトン導電膜は、多孔質ガラス細孔内および表面にプロトン導電性を示す官能基を導入している。すなわち、高いプロトン導電性を保持しつつ、基材に無機化合物を用いることによって耐熱性（約120℃）・耐有機溶剤性を実現した。これにより、従来は不可能であった燃料電池の高温作動が期待できる。高温作動が可能になることにより、これまでは低温で利用できなかった燃料電池の排熱を、例えば吸収式冷凍機や改質器といった外部のシステムへ利用することが可能となる。つまり、総合的にみた燃料電池の

用語説明

①プロトン導電膜

水素イオンのみを通過させる性質の膜（ H_2 [水素] がプロトン導電膜上に担持させた触媒作用によって、 $2H^+$ [水素イオン] と $2e^-$ [電子] に分かれる）。

エネルギー効率が大幅に向上する。

今回の研究グループは、今後、さらに、細孔の配向を制御し、さらに高い導電性を持った膜を開発するとしている。こうした性能や耐久性向上のための研究を進め、さらにはコスト低減等の取り組みも進めることで、PEFCの技術的可能性が拡大すると期待される。

製造技術分野

①半導体製造技術開発で産学官プロジェクトが協力拡大

半導体製造技術に関する次世代技術の共同研究プロジェクトが、2001年度以降相次ぎ実施されている。このたび、これらの研究プロジェクトのうち、産業界主導の「あすかプロジェクト」と産学官共同研究体の「半導体MIRAIプロジェクト」とが、製造技術分野において研究協力を拡大することになった。

「あすかプロジェクト」は、半導体デバイス関連企業11社が共同出資する（株）半導体先端テクノロ

ジーズが進めるもので、2001年度からの5年間の予定で、線幅65nm回路の設計・加工技術の開発を進めている。一方、「半導体MIRAIプロジェクト」は、（独）産業技術総合研究所次世代半導体研究センター、ASET（超先端電子技術開発機構）に参加する企業25社（半導体デバイス製造企業14社・製造装置及び材料系企業11社）、さらに20の大学研究室が参加し、2001年度から7年間の予定で、線幅65～45nm回路の対応技術を研究開発する。両プロジェクトは、世代は異なるものの技術的には関連する部分もあり、また（独）産業技術総合研究所（茨城県つくば市）内の同一のスーパー

クリーンルームを本拠地としている。このため研究効率の面でいっそうの改善を求める声も上がっていた。今回研究協力を始める技術分野としては、シリコンウエハへのイオン注入技術、フォトマスク（回路原板）の欠陥検査技術、ウエハへの絶縁膜の形成・評価技術の三つが対象となる。

日本国内の半導体産業は国際競争力が低下した結果、産業界の再編が進行中であり、研究投資も諸外国企業に比べて相対的に減少している。今後、産学官連携推進の意味においても、主体の異なるプロジェクトどうしの協力拡大を進め、研究効率をいっそう上げることが望まれる。

特集①

「脳科学と教育」 研究の動向

ライフサイエンス・医療ユニット 茂木 伸一*、庄司真理子



1. はじめに

脳は現在もなお未知の部分が多く、今後のライフサイエンス分野における重要な研究対象の一つである。さらに脳科学は、自然科学的な知識の拡大、医療・福祉、情報科学・ロボット工学への貢献だけでなく、教育学、心理学、社会学、言語学等の人文・社会科学への応用など適用範囲が広がってきており、研究の意義がさらに大きくなっている。

脳科学研究の重要性から、米国では1990年代を「Decade of the Brain (脳の10年)」と定め大規模に研究を推進してきたほか、欧州においても、米国の動きに呼応して積極的に脳科学の研究に取り組んできている。

我が国においても、脳科学への取組は科学研究費補助金の重点領域研究や特定領域研究などをはじめとして積極的に行われてきた。さらに、「脳に関する研究開発についての長期的な考え方」(科学技術会議ライフサイエンス部会脳科学委員会、1997年5月)において、「脳を知る」(脳の働きの解明)、「脳を守る」(脳の病気の克服)、「脳を創る」(脳型コンピュータの開発)という戦略目標が掲げられた。そして、脳科学研究の中核的機関として理化学研究所脳科学総合研究センターの発足(1997年10月)や科学技術振興事業団の戦略的基礎研究推進事業における「脳機能の解明」プロジェクトなどの

取組がなされてきている。

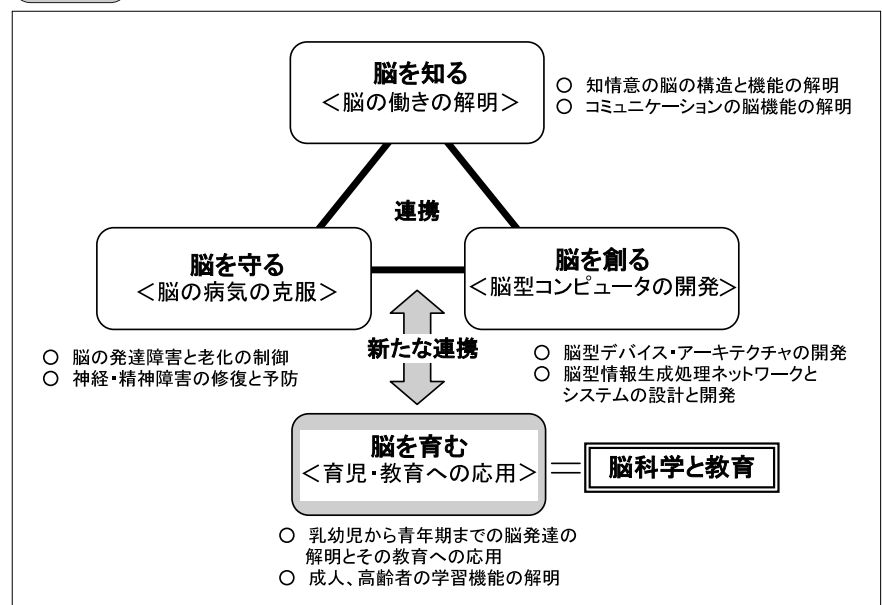
こうしたこれまでの成果によって、記憶や学習といった高次脳機能に関わる機能分子や神経回路網などについて多くの知見が得られてきている。また近年、人の非侵襲的脳機能イメージング法が飛躍的に発展してきており、より精度の高い安全な技術が開発されてきている。一方、少子高齢化社会を迎える我が国においては、脳科学研究での知見を、育児、学校教育、社会生活、高齢者介護など種々の面に応用することの期待も高まっている。

これらを背景として、脳科学研究の新しい戦略目標である「脳を育む」が、「ライフサイエンスに

関する研究開発の推進方策について」(文部科学省科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会、2002年6月)で提案された。「脳を育む」では、乳幼児から青年期までの脳発達の解明とその教育への応用や、成人、高齢者の学習機能の解明を目指すことを目標としている(図表1)。また文部科学省では、2002年3月より「脳科学と教育」研究に関する検討会を設置し、この領域の具体的な施策を検討しているところである。

本稿では、国家的な戦略的取組として世界的にも新しい「脳科学と教育」研究について概要を紹介し、今後の展望を述べる。

図表1 我が国における脳科学研究の概要



(文献^{1, 2)}を参考に科学技術動向研究センターにて作成)

2. 「脳科学と教育」研究の概要

「脳科学と教育」研究は、学習のメカニズムを明らかにすることで、人が本来有している能力の発達・成長や維持およびその障害を取り除くことを目的としている。

文部科学省では、当面（5年程度）の計画と概ね10年を見通した長期計画を策定するため、2002年3月より「脳科学と教育」研究に関する検討会を設置した。本検討会は、教育学、教育心理学、行動学、生物学、小児神経学、脳科学などの専門家によって議論が進められている。現在も具体的な研究計画は議論の途中にあり、2002年7月に中間取りまとめを発表した段階である。また、2001年度より始められた科学技術振興事業団の社会技術研究推進事業（現戦略的創造研究推進事業）において、研究領域の一つに「脳科学と教育」が設置され、現在6課題のパイロット的な研究が進められているところである。

図表2には、これまでの議論などによって想定される「脳科学と教育」研究の概要を示した。当該

研究における「教育」は、人の胎児期を含む生涯を通じた広義の概念である。

ここでは、研究対象としてキーワードとなる脳の可塑性および臨界期についてその内容を紹介する。また、研究手法として重要である非侵襲的脳機能イメージング法について概要を紹介する。

2-1

脳の可塑性（シナプス可塑性）

可塑性とは、何らかの外乱に対応し正常状態を保持するのに示される変化的な性質を言い、脳においてはシナプス可塑性が学習と記憶の基礎的な過程と考えられている。

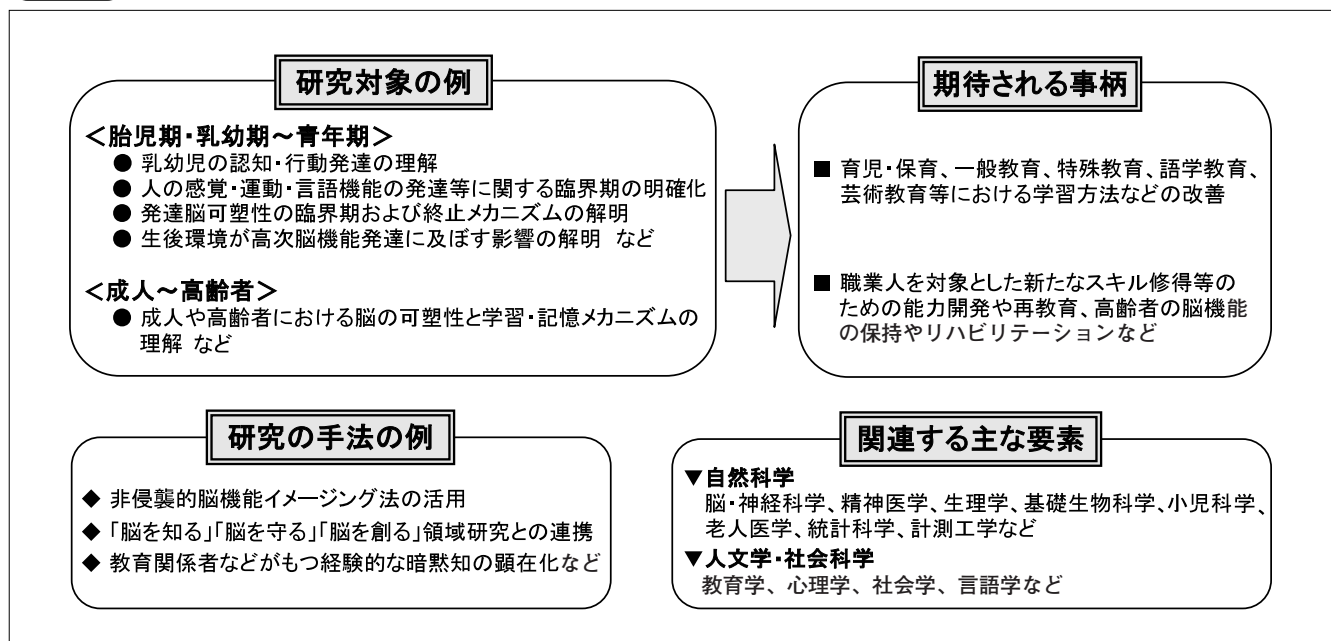
脳は多数の神経細胞（ニューロン）とグリア細胞から成っている。神経細胞は脳の神経回路網の素子として信号を伝達する重要な細胞であり、グリア細胞は神経細胞のサポートを行っている。近年の脳科学においては、これら脳細胞における化学的な信号伝達過程とその背後にある遺伝子制御過程の詳

細な分析が進んだ。

一般に神経細胞は細胞体、樹状突起、軸索から成っており、神経細胞同士はシナプスによって連絡している（シナプス伝達）。軸索に信号が伝達されると興奮性伝達物質や抑制性伝達物質などの神経伝達物質がシナプスで形成され、信号を伝える側の樹状突起上の受容体にその信号を伝える（図表3）。それにより複雑な化学反応が起こり、その信号はまた次の神経細胞や筋肉など外界に働きかけるための細胞に伝えられる。近年この信号伝達機構の研究が非常に進み、イオンチャネル、受容体、伝達物質など100種類以上の分子がこの過程に関与していることが分かっている。

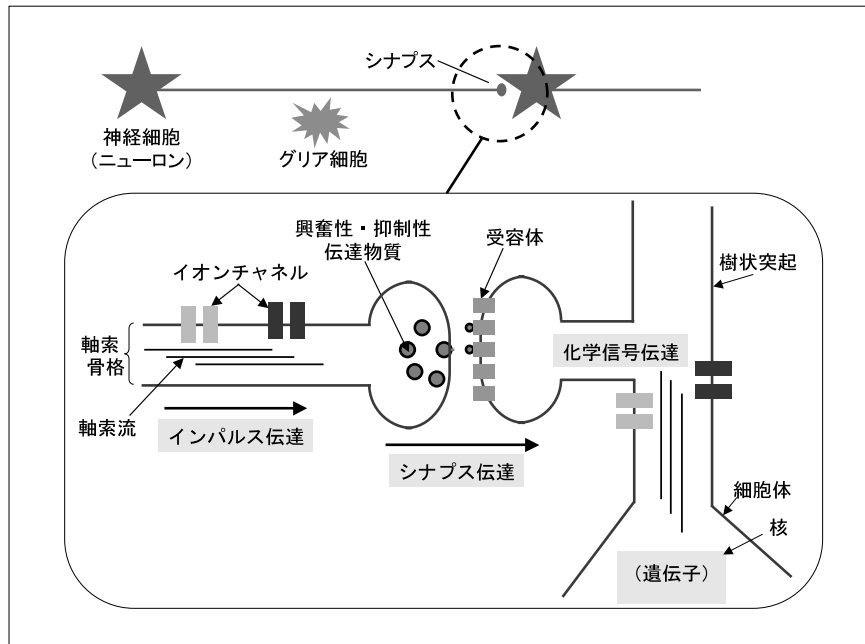
シナプス伝達の効率や形状が活動に依存して持続的に変化することをシナプス可塑性と呼び、これが脳の記憶や学習をする時の最も基本的なプロセスと考えられ、世界的にも非常に研究が進んでいる。シナプス可塑性は、発見された1970年代頃から現在まで

図表2 「脳科学と教育」研究の概要



（文献^{2, 3)}を参考に科学技術動向研究センターにて作成）

図表3 シナプスにおける情報伝達



(理化学研究所脳科学総合研究センター 伊藤正男所長作成資料より引用)

に約10種類のタイプが見つかった。

「脳科学と教育」研究を進める上で、脳の可塑性と学習や記憶のメカニズムを解明することが重要であることから、今後とも当該分野の研究の進展が望まれる。

2 - 2

脳の臨界期・感受期

脳の学習や記憶といった高次機能には、臨界期あるいは感受期（ある現象や反応が起こるか起こらないかが決まる時期）があることが知られている。この時期の幅は、生物種毎の寿命の長さとおおよそ比例しており、時期のピークが短いものを臨界期、ある程度長いものを感受期と呼ぶことが多い。例えば視覚系の可塑性の臨界期（感受期）は、マウスやラットでは日の単位、ネコでは週の単位、人では2年程度である。また、いろいろな感覚や刺激の種類によって感受期が異なることが知られている。

例えば、学習の一つの形態である刷り込み現象の臨界期について、これまでに多くの知見が得ら

れている。刷り込み現象とは、動物の生後わずかの時期に起こる特殊な学習であり、雛鳥が孵化して最初に見た、動くものを母親として認識し、その後にしたがって行動する例などがよく知られている。例えば、ハイイロガン（*Anser anser*：カモ科）を用いた実験では、刷り込み現象が可能な期間はきわめて短く、生後15時間付近にピークがあった（図表4）。

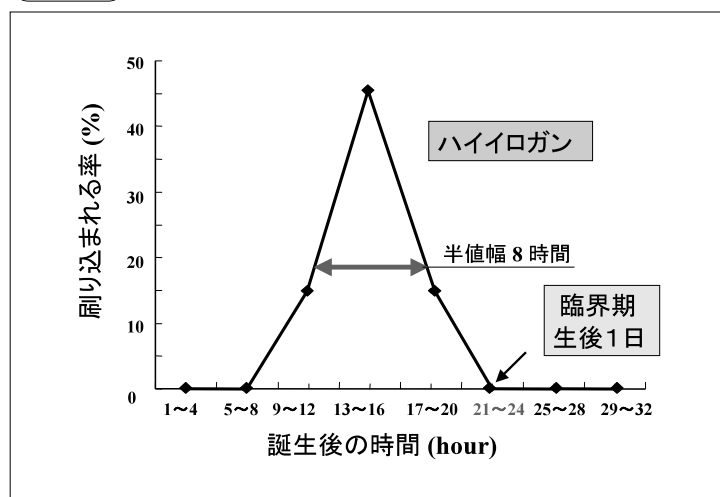
刷り込み現象自体は遺伝子に組

み込まれた過程（genetic process）であるが、最初に目に入る、動く物体の情報、即ち環境からの視覚刺激というような遺伝子に組み込まれていない過程（エピジェネティックな過程（epigenetic process））を経て、刷り込み現象は完成すると考えられている。これは、脳機能の発達に対して生後環境の及ぼす影響が重要な要素の一つであることを示している。

人の場合によく例に用いられるのが言語獲得における感受期である。生後1年以内では、例えばL（エル）とR（アール）の区別のような子音の識別の感受期があることがわかってきた。また、言語獲得における感受期は大体10歳代の前半にあると言われている。このような学習の感受期と環境が及ぼす影響との関係が明らかになれば、人のもつ能力を最大限に引き出すことにつながると考えられる。

人の高次脳機能の感受期と環境との関係については、まだほとんど明確にされていない。今後これらの基礎的研究を進め、その成果を教育などへ応用していくことが「脳科学と教育」研究の目的の一つである。その際、教育の問題はフィードバックに時間を要するた

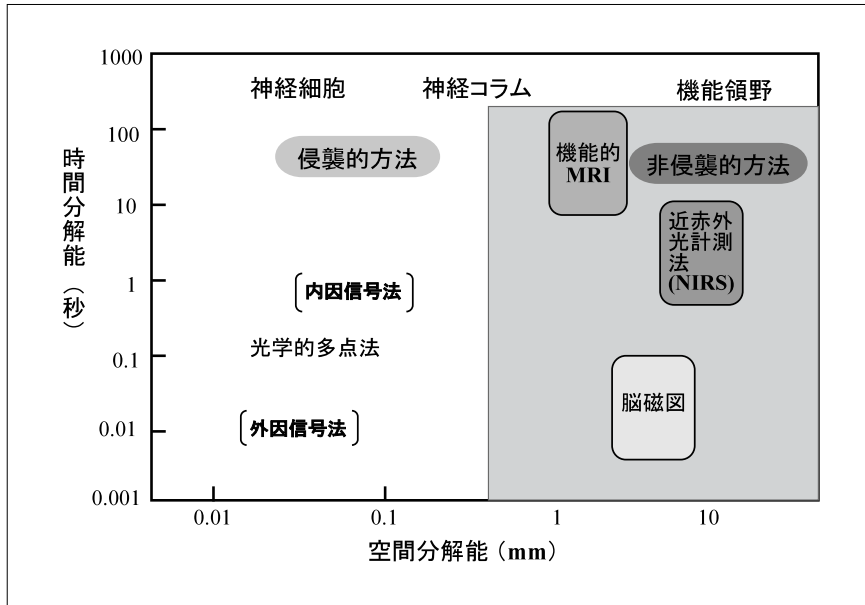
図表4 刷り込み現象の臨界期



注記：図表4では完全に刷り込まれた雛をプロットしている。本研究において、全ての雛が完全に刷り込まれたのではないのでプロットの合計は100%にならない。

(日立製作所基礎研究所・中央研究所 小泉英明主管研究長作成資料より引用)

図表5 高次脳機能イメージング法の比較



注記：数値はおおよその目安であり、各測定方法の概念的な比較を示している。

(日立製作所基礎研究所・中央研究所 小泉英明主管研究長作成資料をもとに科学技術動向研究センターにて一部改変)

め、大規模な縦断的研究および統計解析に加えてその後の追跡調査などを体系的な計画に基づいて進めていく必要がある。

2 - 3 高次脳機能の計測法

近年の、人の思考や記憶といった高次脳機能を対象とする非侵襲的計測技術の飛躍的な発展は、「脳科学と教育」研究を進める上での大きな契機となった。一般に

脳研究における非侵襲計測とは、頭蓋骨を開くといった外科的な侵襲を与えることのない方法を指す。臨床上重要な役割を果たしている PET (Positron Emission Tomography、陽電子放射断層法) や SPECT (Single Photon Emission Computed Tomography、シングルフォトンECT) 等の方法は、脳に外科的な損傷を与えないという意味では非侵襲的計測に含まれるが、放射能を用いるために放射線被爆を伴うという意味で健

常人に適用する場合には制限がある。

現在、人の高次脳機能を計測する上で、安全で有用な非侵襲イメージング(画像)法は、機能的MRI (fMRI、functional magnetic resonance imaging、機能的磁気共鳴描画)、脳磁図(MEG、magnetoencephalography、脳磁計)、近赤外光計測法(NIRS、near-infrared spectroscopic imaging、光トポグラフィー)などである。図表5には、侵襲的方法も含めた各種高次脳機能イメージング法について、空間分解能および時間分解能の関係を示す。

3つの非侵襲的イメージング法について、およその空間分解能と時間分解能、被験者の自由度、計測対象の比較を図表6に示した。

非侵襲的イメージング法のうち、空間分解能に最も優れているのは機能的MRIであり、時間分解能に最も優れているのは脳磁図である。しかしどちらも被験者の自由度は低く、被験者の対象や状態が制限される。なお、近赤外光計測法は空間分解能において改善されるべき余地があるものの、①狭い空間に閉じ込められない、②動くことができる、③騒音がないといった特徴から、新生児や乳幼児の脳活動を自然な環境下で計測することが可能である。

図表6 非侵襲的高次脳機能イメージング法の比較

	機能的MRI	脳磁図	近赤外光計測法
空間分解能	1ミリメートル (特に優れている)	数ミリメートル	10ミリメートル
時間分解能	数十秒	数ミリ秒 (特に優れている)	数秒
被験者の自由度	小	小	大 (特に優れている)
原理	神経活動に伴う血中ヘモグロビンの磁性の差を磁気共鳴信号に反映させることで、刺激に対応した局所脳血流の変化を解析	神経活動に伴って頭表面に誘起される微弱な磁場を高感度磁気センサ(SQUID磁束計)を用いて観測。観測した脳磁図から脳内の電源の局在を推定	濃度変化に応じて変化する近赤外光の吸収率を計測することで、刺激に対応した局所脳血流の変化を解析
主な用途の例	視覚や聴覚などの誘発反応、言語認知や記憶などの高次脳機能など	臨床的には、てんかんや異常徐波の信号源の推定に有用とされるほか、睡眠時の自発脳磁図、電気、磁気、光、音などによる刺激に対する誘発磁界とその信号源の推定など	手術時やてんかんなどの際の脳血流モニターに有用とされるほか、乳幼児の脳機能の測定も試みられている

(日立製作所基礎研究所・中央研究所 小泉英明主管研究長作成資料および文献⁴⁾をもとに科学技術動向研究センターにて作成)

しかし、より高い精度で高次脳機能を把握するためには、現在の非侵襲的イメージング法にはまだ多くの技術的課題が残されている。そもそも脳機能計測は技術的に難しい計測法であることに加え

て、「脳科学と教育」研究では被験者の主な対象に乳幼児などが含まれることから、特に安全性の高い計測法が必要とされる。これまで我が国において計測技術開発はあまり注目されてこなかった分野

であったが、特に「脳科学と教育」研究を進める上では最も重要な要素の一つであり、今後の積極的な取組が求められる。

3. 「脳科学と教育」研究に関する国際的な動向

1999年、経済協力開発機構（OECD）の教育研究革新センター（CERI）は、「学習科学と脳科学～教育政策・実践への応用の可能性～（Learning Sciences and Brain Research～Potential Implications for Education Policies and Practices～）」というプロジェクトを立ち上げた。これは、加盟先進30カ国で推進を図る国際研究プログラムである。2002年度からは第2期が開始され、脳研究の教育分野への応用について、3つの研究ネットワーク（生涯学習、計算学習、読み書き学習）を形成し、研究が行われる予定である（図表7）。このうち、我が国は理化学研究所脳科学総合研究センターを中心として「脳の発達と生涯に亘る学習」領域の調整役を行うこととなった。

このように、近年国際的にも「脳科学と教育」研究領域が注目され、取組が始められているところである。

米国では、NIH（National Institutes of Health、国立衛生研究所）を中心に脳科学研究を大規模に推進してきている。NIHでは

図表7 経済協力開発機構・教育研究革新センター（OECD・CERI）「脳研究と教育科学の融合」研究プロジェクト

第1期（1999－2002年）

以下の3つの国際フォーラムを開催

- 幼児期における学習科学と脳研究（2000年6月、米国・ニューヨーク）
- 青年期における学習科学と脳研究（2001年2月、スペイン・グラナダ）
- 成人期における学習科学と脳研究（2001年4月、埼玉県和光市）

第2期（2002－2005年）

以下の3国際研究ネットワークによる試行的な研究を実施

- 脳の発達と生涯に亘る学習（調整機関：理化学研究所脳科学総合研究センター）
- 脳の発達と算術思考（調整機関：英国オックスフォード大学）
- 脳の発達と読み書きの能力（調整機関：米国サックラー研究所）

（理化学研究所脳科学総合研究センター 伊藤正男所長作成資料より引用）

いくつかの研究所にまたがって脳科学研究が行われているが、特に、2000年12月に設立されたNIBIB（National Institute of Biomedical Imaging and Bioengineering、国立生体イメージング・生体工学研究所）はイメージング技術の開発などを目的としており、脳機能計測技術の面で注目される。小児科学に関しては、NICHD（National Institute of Child Health and Human Development、国立小児保健・人間発達研究所）が中心となって研究が行われている。

またNSF（National Science Foundation、全米科学財団）およびDOC（Department of Commerce、商務省）は、2001年12月に開い

たワークショップをもとに「Converging Technologies for Improving Human Performance（人間の能力改善のための技術の集結）」というレポートをまとめている。ここでは、個人の能力改善などを目的として、学習やコミュニケーションなど人間活動に関わる領域において、ナノテクノロジー、バイオテクノロジー、IT、認知科学を集結させた学際的（multidisciplinary）な研究開発を進める必要性と今後の戦略を提言している。ここで提示された領域には「脳科学と教育」研究に関連するものもあり、今後の米国の動向が注目される。

4. おわりに

「脳科学と教育」研究は国際的にも始められたばかりの新領域である。この領域は多くの異分野を架橋・融合したものであり、各分野の連携が重要となる。特に、これまでほとんど接触のなかった育児・教育の専門家と脳科学・医学研究者との対話は欠かせない。

研究を進める上では、脳の学習や記憶といった高次脳機能についての理解を深めるため、「脳を知る」「脳を守る」「脳を創る」領域研究などとの連携が必要である。このような連携に脳機能計測法の発達が加わることが、「脳科学と教育」研究のブレークスルーにつ

ながると考えられることから、自然な環境下で非侵襲的に高次脳機能の動態イメージングができる手法や、大脳の表面だけでなく、例えば記憶に重要な役割を果たしている海馬のような脳の内部についても簡便に計測できるような新たな技術開発に向けた施策が必要で

ある。

また、教育の問題は社会的影響が大きく、かつ仮説の検証に時間を要する。したがって、感受期と学習との関係といった基礎的な研究成果を教育へ応用する際には、体系的な計画に基づいた大規模な縦断的研究とそれに基づく統計解析などを行った上で結論を出す必要がある。

「脳科学と教育」研究は社会的にも重要な課題である一方、他の領域以上に倫理的配慮や社会の理解・協力が必要である。

謝辞

本稿は、科学技術政策研究所において2002年9月25日に行われた理化学研究所脳科学総合研究センター所長伊藤正男氏による講演会

「脳科学と教育」および、2002年10月10日に行われた日立製作所基礎研究所・中央研究所主管研究長小泉英明氏による講演会「脳科学と教育」をもとに、我々の調査を加えてまとめたものである。

本稿をまとめるにあたって、伊藤所長と小泉主管研究長には、御指導をいただくとともに、関連資料を快く御提供いただきました。また、国立精神・神経センター神経研究所の金澤一郎所長、新潟大学脳研究所附属統合脳機能研究センターの中田力センター長、金沢工業大学人間情報システム研究所の鈴木良次所長、北海道大学電子科学研究所の田村守教授、島根医科大学の小林祥泰教授には、各種情報をいただきました。文末にはなりますが、ここに深甚な感謝の

意を表します。

引用文献・参考文献

- 1) 「脳に関する研究開発についての長期的な考え方」(科学技術会議、ライフサイエンス部会、脳科学委員会、1997年5月)
- 2) 「ライフサイエンスに関する研究開発の推進方策について」(文部科学省科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会、2002年6月)
- 3) 「『脳科学と教育』研究に関する検討(中間取りまとめ)」(文部科学省「脳科学と教育」研究に関する検討会、2002年7月)
- 4) 神谷瞭、井街宏、上野照剛「医用生体工学」、培風館、2000年

.....

特集②

燃料電池自動車普及の鍵を握る
水素貯蔵材料

材料・製造技術ユニット 玉生 良孝*
客員研究官 緒形 俊夫



1. はじめに

水素は究極のクリーンエネルギーといわれている。2002年には水素をエネルギー源とした燃料電池の実用化を推進すべく、燃料電池搭載自動車の第1号車が政府によって購入された。またこの水素燃料電池自動車の導入基盤を整備する目的で、2003年から新たにNEDO(注1)において、水素安全利用等基盤技術開発プロジェクトが始まろうとしている。まだ技術面で十分には成熟しきっておらず、またコストの面でも採算が取れない段階で、燃料電池自動車の市販と導入が図られた背景には、単に地球温暖化に伴う二酸化炭素(CO₂)削減対策や化石燃料資源の代替エネルギーとしての位置付けだけではなく、日本経済の繁栄をもたらした産業の一つである自動車産業の将来をも見据えた重要な決断があったものと考えられる。ここで、改めて水素エネルギーに関する産業の将来を見つめ直すためにも、今後の普及の鍵を握ると見られる水素貯蔵材料を取り上げ、技術的課題について整理してみる。

(注1) 新エネルギー・産業技術
総合開発機構 (New Energy and
Industrial Technology Develop-
ment Organization)

水素は酸素と反応し水を生成することが知られているが、そのまま燃焼させれば熱エネルギーに、水素エンジンの様な内燃機関を用いることにより機械エネルギーに、また燃料電池を利用することにより直接電気エネルギーに変換することが可能で、エネルギー変換媒体と考えることができる。いずれの過程においても、水素と酸素が反応して生成される物質は水であり、地球温暖化ガスであるCO₂は排出されない。また水素は水の電気分解や熱化学分解等により製造可能な二次エネルギーであるため、太陽光エネルギーの様な再生可能エネルギーとの組合せによって、資源制約や地球環境負荷の少ない理想的なクリーンエネルギーシステムとして、水からの水素をベースとする水素エネルギーサイクルを描くことができる¹⁾。これが水素は究極のクリーンエネルギーといわれる所以である。また、水素は物質(モノ)であるので、電気エネルギーに比べ大量貯蔵において優位性があり、これらのことが化学エネルギーとしての水素をユニークなものにしている(補足参照)。

水素エネルギーシステムを実現させるためには、水素の製造・輸送・貯蔵・利用に関わる各要素技術の開発や社会基盤の整備が前提となる。本誌2002年10月号では、

持続可能な水素エネルギーシステム構築のキーテクノロジーとして、「化石資源を用いない水素製造技術」に焦点を当て、主要製造技術の開発動向や課題について分析した。その中では、水素エネルギーシステムは、製造・輸送・貯蔵・利用技術等を含めた全体の枠組みの中で議論されるべきであることが指摘された。

水素の利用技術としては、アンモニアやメタノールの合成、石油の脱硫精製等の化学工業用、鉱石還元などの金属工業用、半導体製造などのエレクトロニクス産業用、光ファイバーやガラス製造等のガラス工業用の工業用原料として幅広い分野が挙げられるが^{2, 3)}、将来的にはエネルギー変換機能を利用した分散電源としての定置用燃料電池や輸送用の燃料電池自動車用途が期待されている。水素を燃料とする燃料電池自動車(注2)を普及させていくためには、燃料電池自動車内に、ガソリン車のガソリンタンクに代わる、車載水素貯蔵装置が必要になる。またガソリンステーションに代わり水素供給ステーションがインフラとして整備される必要がある。これらには何れも水素を一時的に貯蔵し、必要な時に必要な量の水素を適切なスピードで安定的にかつ安全に供給できる能力を備えた水素の貯蔵技術が求められる。

水素エネルギーを普及させていくためには実用的かつ経済的な水素貯蔵技術の開発が強く求められる。本稿では、究極のクリーン自動車といわれ、水素エネルギーシステム社会実現の橋渡し役となり得る水素燃料電池自動車を想定して、水素貯蔵について材料の観点

から最近の研究開発動向を概観し、今後の方向性等について提言する。

(注2) 本稿では、燃料電池自動車を、純水素を燃料とする純水素型に限り、ガソリンやメタノ

ールを車載改質器で水素に変換する改質型は含まれない。また、補助電源としての2次電池（バッテリー）やキャパシタを組み合わせたハイブリッドタイプを含む。

《補足》水素の基本的性質

水素は常温常圧では気体であり、最も軽くて燃えるガスとしてよく知られているが、ここでは水素燃料電池自動車や水素供給ステーションに使用される際に特徴的な水素の性質を示す。

- (1) 酸素との反応生成物は水であり、環境破壊の恐れが無いクリーンエネルギーである。
- (2) 原料が水であるため、種々の再生可能エネルギーを利用して、水の電気分解等で造り出され得る二次エネルギーであり、資源的な制約が無い。
- (3) 常温常圧では気体であるが、沸点-253℃（常圧）以下の極低温では液体である。
- (4) 電気や熱とは異なり、水素は物質（モノ）であるため、大量貯蔵に適している。
- (5) 比熱が20℃、大気圧で14.9J/g・Kと大きく、空気の約14倍あり、また熱伝導度も空気の約7倍あるので、冷却用媒体として利用できる。
- (6) 燃焼時の発熱量は1kg当たり121MJで、ガソリン（44MJ）の2.75倍であり、単位質量当たりのエネルギー密度が大きい（軽い）。
- (7) 単位体積当たりの発熱量は1m³当たり8.6Jとガソリン（29.8J）の約0.3倍でかさばる。
- (8) 燃焼させなくとも、燃料電池を使用して発電すれば直接電気エネルギーを取り出すことが可能である。
- (9) 元素の中で最も原子半径が小さく（0.37 Å）、材料の格子中に入出りが可能であり、拡散係数も大きいので、水素を材料中にエネルギーとして貯蔵し、必要な時に取り出して利用することができる。
- (10) 可燃性のガスであり、空気中の濃度が4vol%を越えると火災や爆発の危険性がある。また発火エネルギーが小さく、着火しやすい。
- (11) 密度は空気の1/14と軽く閉塞場所では上部に滞留するが、拡散速度が非常に大きく、粘性は非常に小さいためオープンスペースでは散逸しやすい。

2. 水素貯蔵に求められる特性

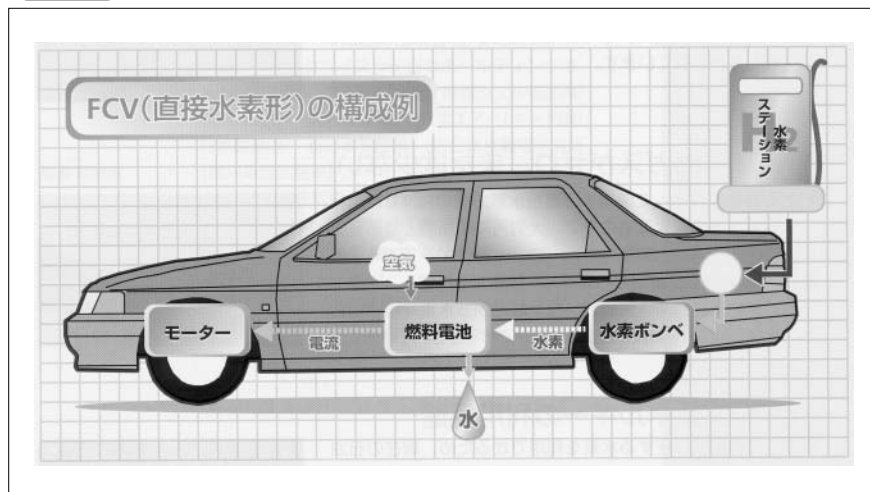
水素を燃料電池自動車の燃料として上手く使いこなすことができれば、交通量の多い都市部における環境問題対策として有望であり、長期的な視点に立てば、現在の自動車社会が依存する化石燃料を代替する再生可能エネルギーを出発点とする究極のクリーンエネルギーとして期待される。反面、水素燃料電池自動車を普及させて

いくまでには克服しなければならない技術的課題や経済・社会的課題が多く残されていることも事実である。燃料電池自動車が普及していくためにはガソリン自動車並みの快適性や経済性が求められる。図表1に水素燃料電池自動車の概念図を示す。大別して燃料供給系、燃料電池本体、制御系、駆動系より構成される。燃料電池自

動車の性能向上には、燃料電池本体の出力密度等、基本性能のより一層の向上が求められるが、それと同時に燃料貯蔵に残された課題も多い。

経済産業省、国土交通省及び環境省の副大臣会議「燃料電池プロジェクトチーム」では、乗用車における1充填の航続距離の目標値を500km以上とし、これを達成す

図表1 水素燃料電池自動車の概念図



出典：水素・燃料電池実証プロジェクトのパフレット「燃料電池自動車」

るために5kgの水素を貯蔵する技術が必要とした⁴⁾。この体積は0℃、大気圧の標準状態では56m³を占めることになるので、水素をコンパクトに収納する必要が生じてくる。

水素貯蔵材料^(注3)に求められる特性としては、

- (1)吸蔵させた水素を死蔵させたり散逸させることなく有効に放出して利用でき（有効水素吸蔵量^(注4)が多い）、吸蔵-放出サイクルにおけるエネルギ

ー消費が小さいこと（エネルギー効率が高いこと）

- (2)コンパクトであること（貯蔵材料体積当たりの有効水素吸蔵量が多いこと）
- (3)軽いこと（貯蔵材料質量当たりの有効水素吸蔵量が多いこと）
- (4)通常環境条件で水素を出し入れし易いこと（燃料電池との相性を考えると水素放出は100℃以下で行われることが望ましい）
- (5)サイクル特性に優れているこ

と（5000回の吸蔵-放出サイクルでの水素吸蔵能力が初期の90%以上であること）

- (6)設備コスト、ランニングコストが安いこと
- (7)安全で取り扱いやすいこと

等が挙げられる。現状ではこれらの特性を全て満たす技術は未だ無く、実用水素燃料電池自動車の燃料車載方式は定まっていない。しかしながら、自動車メーカー各社は圧縮水素ガス^{5, 6, 7)}や液体水素⁸⁾搭載等により水素燃料電池自動車の開発を進めながら、各種の水素貯蔵技術を見極めている。

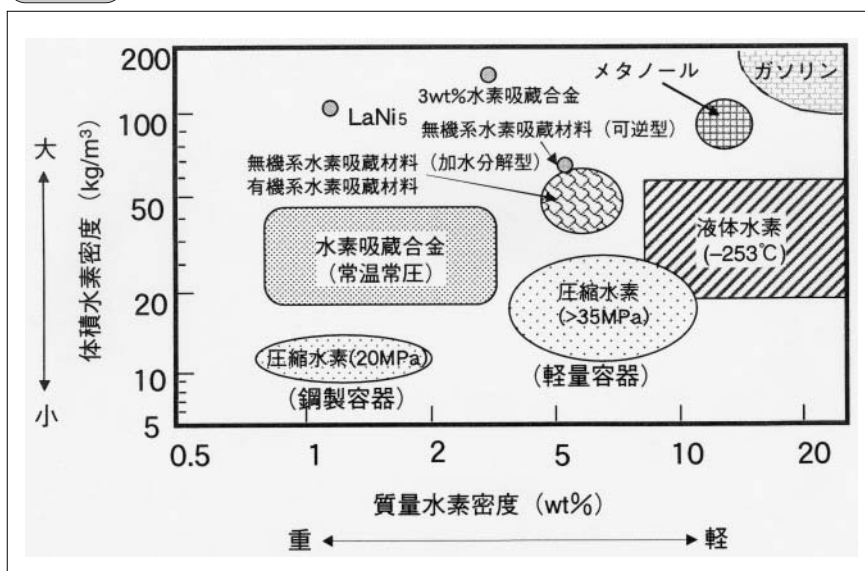
(注3) 本稿でいう水素貯蔵材料とは、水素吸蔵合金の様に材料自身が水素を吸蔵放出する能力を有するものと、水素タンクの様に水素を充填するための容器用材料とを総称している。

(注4) WE-NETでは、水素の放出温度を60℃として、「有効水素吸蔵量 = 10気圧の水素吸蔵量 - 大気圧の水素吸蔵量」と定義している。

3. 各種水素貯蔵材料

水素の貯蔵法としては、圧縮ガス方式、液体水素方式、水素吸蔵合金等が実用的技術として開発されている。また、近年新しい水素貯蔵法として、炭素系材料、或いは有機系、錯体系の水素化物を用いた化学系材料による水素貯蔵も研究されている。図表2に各種水素貯蔵法による水素密度の比較を示す。本章ではそれぞれの水素貯蔵技術の特徴と課題を述べる。

図表2 各種水素貯蔵技術の質量水素密度と体積水素密度の比較



3-1

圧縮ガス

圧縮ガスによる水素貯蔵方法は、水素の貯蔵方式としては、現

- ガソリン、メタノールはエネルギー密度で換算
- 質量水素密度、体積水素密度はいずれも容器を含む

出典：文献¹⁸⁾

在最も一般的な方法である。水素は金属材料に比べ原子半径が極めて小さいため容易に材料中に浸透するが、一般に金属材料が水素を吸収すると脆くなる（水素脆性）ので水素タンク用容器材料には水素脆性を起こさない材料を用いる必要がある。定置式では水素ボンベと呼ばれる赤い耐圧容器が知られている。これは約150～200気圧^(注5)に加圧した水素ガスを肉厚、軟鋼製の円筒状容器に詰めたものであるが²⁾、自動車用には鋼製容器では重くなるため、軽量化のためにカーボン繊維強化プラスチック複合材料で耐圧強化したアルミニウム製の軽量水素燃料タンクが開発されている³⁾。図表3に開発された自動車用高压ガスタンクの例を示す。

(注5) 圧力単位には、真空を0とする絶対圧力と、大気圧を0とするゲージ圧があるが、本稿では圧力単位をゲージ圧で表示する。また、簡単のため0.1MPa = 1気圧として記述している。即ち、1.1MPa = 1.0MPaG = 10気圧としている。

水素ガスに適用される法律等の規制^(注6)では、基本となる「高压ガス保安法」が中心的な役割を果たし、技術上、保安上の基準が政令・省令、告示により補完されている⁹⁾。従来、高压ガスの水素を車に搭載することは認められていなかったが、2001年4月に積載が解禁された。しかしながら、水素ガスタンクは、現状では最高圧力が350気圧に制限されている^(注7)。ため、水素燃料電池自動車の航続走行距離は300～355kmに限られている^{5, 6)}。ガソリン車並みの航続走行距離(500km)を達成するには充填圧力をより高压化して水素の搭載量を増やすことが望ましく、700気圧対応の車両搭載型超高压タンクの開発が検討されてい

図表3 自動車用高压ガスタンクの例



(a)乗用車のトランクスペースに収納された350気圧高压水素タンク

出典：<http://www.ford.com/en/ourVehicles/environmentalVehicles/hydrogenFuelCellElectricVehicles/ford-focus-fcv-hybrid.htm>



(b)天然ガス用FRP容器

出典：<http://www.nkk.co.jp/release/0111/1120-2.html>

る⁴⁾。一方、高压まで昇圧すると昇圧過程におけるエネルギーロスも増大するので圧縮機の効率化等が必要である。

(注6) 主要関連法規として、高压ガス保安法、電気事業法(経済産業省所管)、道路運送車両法、道路法、建築基準法(国土交通省所管)、消防法(総務省所管)がある。

(注7) 繊維強化プラスチック複合容器は高压ガス保安法に基づき一般複合容器として解釈され、容器の最高圧力は350気圧に制限される。

超軽量耐圧容器の開発に伴って周辺技術の規制緩和も検討されているが、現状では水素圧縮機、電磁バルブ、高压タンク等の水素インフラ関連機器は外国製であり、水素インフラを円滑に整備する上で支障が出る可能性が考えられる⁴⁾。これらの要素技術を国内にも保有することは、水素の安全性を確保するためにも重要と思われる。

(注8) 繊維強化プラスチック(Fiber Reinforced Plastic)

3-2

液体水素

水素を-253℃という極低温にすると液化され、標準状態での水素ガスに比べ体積は約1/800になり、圧縮水素よりもコンパクトになる。しかしながら液体水素は極低温液体であるため、液化工程に大量の電力を消費し、総合エネルギー効率が大きく低下する点が問題である。またボイルオフと呼ばれる貯蔵中の蒸発ロス量を少なくするため断熱保冷された特殊容器での貯蔵が必要となる。液体水素貯蔵タンクでは低温材料開発と断熱構造設計が重要である。

液体水素貯蔵用低温材料としては、常温域から液体水素温度に亘り十分な機械的性質(引張強度、

世界の燃料電池自動車が走行距離を伸ばすため、より高压の水素ガスを使う車両開発を進めているのを受け、例えば、ドラム缶大手の鋼管ドラム(株)は、従来350気圧圧縮水素ガス容器(図表3(a))を販売していたが、水素燃料電池自動車の700気圧高压水素ガスの車両搭載および充填システムの開発を、カナダのダイネテック社と、共同で開発することとした。同社の容器は、アルミ・カーボンFRP^(注8)ライナー容器で、従来天然ガス自動車向けだった容器(図表3(b))を、高压水素ガス向けに機能強化するとともに、水素燃料電池自動車用システムとしての開発を目指すものである¹⁰⁾。このような

破壊靱性、疲労強度等）を有し、低温脆化や水素脆化を起こさない材料が求められる。WE-NETにおいては、極低温用構造材料として実績のあるステンレス鋼とアルミニウム合金を候補材料に選定し検討が行われてきた。その結果、選定した材料の低温脆化および水素脆化は、母材については液体水素雰囲気下でも、強度、靱性等充分高い特性を持つものの、溶接部では低温脆化および水素脆化について脆化感受性が高く靱性の改善が必要であることが指摘された。靱性向上を目指した溶接法や溶接材料の検討を行った結果、ステンレス鋼では減圧電子ビーム溶接法（RPEB）が、またアルミニウム合金では摩擦攪拌接合法（FSW）が低温靱性向上に有効であることを見出した⁹⁾。今後は水素環境脆化挙動を詳細に研究すると共に、中小規模容器用薄肉材および付帯機器用材料として想定される軽量高強度のチタン合金等についても検討が進むことが期待される。

液体水素は、圧縮ガスよりも水素の貯蔵密度が高くなるため、現

在でも宇宙ロケットエンジン用の燃料等に利用されている。しかしながら、極低温貯蔵中のエネルギー消費やボイルオフガス対策の必要があるため、比表面積が小さく断熱性が良くなるある程度規模の大きい、例えば液体水素タンカーや液体水素タンクローリーの様な、大量貯蔵・輸送に向けた技術と考えられる。首都圏で計画中の水素供給ステーションの一部では液体水素貯蔵方式が実証試験される計画であり¹¹⁾、またGMは液体水素搭載の燃料電池集配車の商用試験を2003年から東京で行うと発表している⁸⁾。

3 - 3

水素吸蔵合金

金属の中には水素と反応して金属水素化物を生成しやすいものがある。水素を金属表面に接触させると水素分子は金属表面に吸着され、解離して原子状水素になる。原子状水素は、金属原子間の空隙に侵入し、急速に内部拡散して格子間位置に捉えられ金属水素化物

を形成する。水素化物を生成しやすい金属(A)と水素化物を生成しにくい金属(B)を組み合わせることにより、水素を吸蔵したり放出したりすることが可能な水素吸蔵合金をつくることができる。水素吸蔵合金はAとBの原子比によりAB₅型合金、AB₂型合金等に分類されるが、Aサイトの元素としてはMg、Ti、Zr、V、希土類金属等の2A～5A族に属する金属、Bサイトの元素としてはFe、Ni等の6A～8族に属する金属で構成される。通常合金中では水素は水素化物として固定され、体積は常温常圧の1/1000程度にコンパクトになるが、重量密度は鋼製の圧縮水素容器と同等程度で、重くなるのが問題である。図表4に主な水素吸蔵合金とその水素化物の性質を示す。

水素吸蔵合金の実用化はニッケル水素二次電池（バッテリー）の電極材料（AB₅型合金）で先行した。WE-NETにおける水素吸蔵合金の開発は当初、有効水素吸蔵量3wt%以上を目標として進められてきたが、水素自動車用タンクへの適用を強く意識して、目標値が5.5wt%に変更された¹²⁾。しかしながら、図表4中の殆どの合金の水素吸蔵量は1～2wt%程度に留まっており、Mg系等の一部の合金に軽量化への期待が寄せられる。ドイツの「ミュンヘン空港水素プロジェクト」では、水素の供給、貯蔵技術に多方式のシステムを採用し、水素ステーションの水素貯蔵に30気圧、2,000Nm³の貯蔵能力を持つFe-Ti系（吸蔵時5℃、放出時77℃）の水素吸蔵合金が使用された¹³⁾。

また水素吸蔵合金の水素化・脱水素化反応は化学反応であり熱の出入りが伴う。水素吸蔵時は発熱反応、放出時は吸熱反応となる。反応中の合金の温度が大きく変化すると化学平衡がずれ水素化・脱水素化反応が進みにくくなる。こ

図表4 主な水素吸蔵合金とその水素化物の性質

型	合金	水素化物	水素吸蔵量 wt %	水素放出圧 MPa* と (温度℃)
AB ₅	LaNi ₅	LaNi ₅ H _{6.0}	1.4	0.4 (50)
	LaNi _{4.6} Al _{0.4}	LaNi _{4.6} Al _{0.4} H _{5.5}	1.3	0.2 (80)
	MmNi ₅	MmNi ₅ H _{6.3}	1.4	3.4 (50)
	MmNi _{4.5} Mn _{0.5}	MmNi _{4.5} Mn _{0.5} H _{6.6}	1.5	0.4 (50)
	MmNi _{4.5} Al _{0.5}	MmNi _{4.5} Al _{0.5} H _{4.9}	1.2	0.5 (50)
	MmNi _{2.5} Co _{2.5}	MmNi _{2.5} Co _{2.5} H _{5.2}	1.2	0.6 (50)
	MmNi _{4.5} Cr _{0.5}	MmNi _{4.5} Cr _{0.5} H _{6.3}	1.4	1.4 (50)
	Mm _{0.5} Ca _{0.5} Ni ₅	Mm _{0.5} Ca _{0.5} Ni ₅ H _{5.0}	1.3	1.9 (50)
	CaNi ₅	CaNi ₅ H _{4.0}	1.2	0.04 (30)
AB ₂	TiMn _{1.5}	TiMn _{1.5} H _{2.47}	1.8	0.7 (20)
	TiCr _{1.8}	TiCr _{1.8} H _{3.6}	2.4	0.2～5 (－78)
	ZrMn ₂	ZrMn ₂ H _{3.46}	1.7	0.1 (210)
	ZrV ₂	ZrV ₂ H _{4.8}	2.0	10 ⁻⁹ (50)
AB	TiFe	TiFeH _{1.95}	1.8	1.0 (50)
	TiFe _{0.8} Mn _{0.2}	TiFe _{0.8} Mn _{0.2} H _{1.95}	1.9	0.9 (80)
A ₂ B	Mg ₂ Ni	Mg ₂ NiH _{4.0}	3.6	0.1 (253)

* 本図表内の圧力単位は絶対圧力

出典：文献²⁾をもとに科学技術動向研究センターで編集

のため、水素吸蔵合金容器には反応熱を速やかに伝える熱伝導性の良い材料と構造設計を採用する必要がある。さらに水素吸蔵合金は、水素の吸蔵・放出のサイクルで体積膨張収縮を繰り返して割れが進行し微粉化するので、合金粉末が容器の一部に偏って固化し容器が変形してしまうことがない様に合金の充填密度を抑えたり、隔壁等で仕切る等の工夫が、不純物ガスによる被毒対策と共に必要である。軽量化の観点から水素吸蔵合金には一層のブレイクスルーが望まれる。また反応熱のハンドリングと微粉化に関しては合金と容器構造双方から対策を講じる必要がある。

3 - 4

炭素系材料

近年、カーボンナノチューブやグラファイトナノファイバー等の新たなナノ構造をもつ炭素系物質が発見され、機械的、電気的、化学的に極めて優れた特性を有することが報告され、その水素吸蔵・吸着特性にも高い関心が持たれ各方面で研究が盛んに行われた。これらの炭素系材料に関して報告された水素の吸蔵・吸着特性の中には、水素吸蔵合金を遙かにしのぐ水素貯蔵量が報告されたものもあったが^{14, 15)}、一方では殆ど水素を吸蔵しないとの報告もある¹⁶⁾。これらの物質に関しては第三者研究機関で水素吸蔵の再現性が確認された例が無い。これらの材料の安定した製造方法や微量な材料に対する水素吸蔵量測定方法が十分に確立されていないことが障害となっている。当面は製造技術や測定技術の向上と共に、水素-炭素原子間の相互作用の有無等を調べ、水素吸蔵・吸着機構の理論的解明を併行して進めるべきであろう。

他方、層状構造をした黒鉛（グラファイト）を水素雰囲気中で機

械的に粉碎処理することによりナノ構造化を発達させると7wt%を越す水素が貯蔵されることが報告された¹⁷⁾。このとき、炭素と水素の結合には2種類あり、炭素原子と強く結合した水素は630℃の高温でしか放出されず水素貯蔵には不向きであるが、炭素原子と弱く結合した水素は300℃で放出されるようになり、その量は6wt%に相当する。この放出温度を100℃以下にするべく触媒等の研究が現在進められている。

一般に炭素系材料は、かさ密度が低いので水素のコンパクトな貯蔵には不向きといわれているが、10wt%近い質量水素密度を達成できれば水素貯蔵材料として競争力を有するものと考えられる。革新的な水素貯蔵材料の発見・製造には、材料の構造を原子レベルで設計したり、材料の構成原子と水素の結合を電子レベルで制御していくことが求められる。新材料創製にはナノテクノロジーの果たす役割が大きい。

3 - 5

有機系水素化物 (有機ケミカルハイドライド)

有機系水素貯蔵材料として、シクロヘキサン-ベンゼン系、メチルシクロヘキサン-トルエン系、デカリン-ナフタレン系等の有機化合物の水素化・脱水素化反応系を利用した水素貯蔵技術が注目を集めている。これらの系の水素貯蔵量は、それぞれ、重量当たりで7.1、6.2、7.3wt%、また体積当たりで55、48、65kg/m³と高い値である。これらの材料はナフタレンを除き室温で液体であり、高压や低温といった特殊な条件が無く、常温常圧で取り扱えるので輸送・充填時の取り扱いが容易になるという利点もある¹⁸⁾が、脱水素化反応後にはベンゼン、トルエン、ナフタレン等の残滓が残るので、

これらを回収して再び水素化し再生する工程が必要となる。

有機系水素貯蔵材料は一般に脱水素反応に250～400℃以上の高温が必要で、脱水素反応時の吸熱量が水素吸蔵合金の約2倍と、水素取り出しに多くのエネルギーを確保する必要がある。また、脱水素反応で生成した有機物蒸気と水素の分離工程も必要である。現状では、低温での水素化・脱水素化反応を促進する担持金属触媒の探索や反応条件の最適化を課題として基礎研究が行われている段階である。

有機系水素貯蔵材料を自動車に搭載する場合には、タンクごと着脱交換するカートリッジ方式の流通システムを構築する必要があることや、システムとして、水素貯蔵材料用の容器以外にも水素を取り出すための反応器や精製器が必要になるため、車載用としての水素貯蔵性能を他の水素貯蔵材料と単純に比較することは難しい。最初はむしろ水素供給インフラの中で技術の経済合理性や実用性が評価されるものと考えられる。

3 - 6

錯体系水素化物

アラネートとよばれるアルミニウム水素化物等の無機系水素化物材料が水素吸蔵材料として最近注目されている¹⁹⁾。NaAlH₄にTiの塩を触媒として添加すると百数十℃で可逆的に水素を吸蔵・放出する様になる。脱水素化反応は2段階で進行し、水素吸蔵量は第1段階で3.7wt%、全体で5.5wt%に相当し、体積水素密度はそれぞれ43.2、70.6kg/m³と水素吸蔵合金(20～50kg/m³)と同等以上である。また、この材料は水素化された状態で圧縮成型して容器に充填可能なので、未水素化状態で水素化後の体積膨張を考慮して容器に充填しなければならない水素吸蔵

合金に比べて充填率を高めることが可能である。現状の反応温度と反応速度は実用的な水素貯蔵材料としては不十分であるが今後の開発が期待される¹⁸⁾。

NaAlH₄以外の材料としてはNa₃AlH₆、Na₂LiAlH₆、Li₃AlH₆等があり、その理論水素吸蔵量はそれぞれ3.0、3.5、5.2wt%であるが、実際の水素吸蔵量は実験条件に大きく依存し、可逆性や反応速度、反応温度の問題も考えられるため、水素貯蔵材料としての適応性

を見極めるにはさらに基礎研究を進める必要がある^{12, 18)}。

この他にNaBH₄等の軽金属から構成される水素化ホウ素化合物(ボロハイドライド)を水素貯蔵材料とする方式の開発が提案されている。これらの物質は水と反応することによって水素を発生し、その水素含有率は反応に必要な水も含めてNaBH₄で10.8wt%と大きい。ボロハイドライドの水素貯蔵方式は、液体状態の水素貯蔵材料と水とから触媒を使い加水分解

によって水素を発生させるものであり、常温、常圧下で十分な水素供給速度を得られることが特徴である²⁰⁾が、加水分解反応で生成するNaBO₂を回収し、元の水素化物に戻してリサイクルするシステムを構築する必要がある。水との反応で生成したNaBO₂を還元して元の水素化物に戻すためのプロセスに理論的にも水素の燃焼熱の1/3程度のエネルギーを必要とすることはエネルギー効率の観点からは問題となろう¹⁸⁾。

4. 燃料電池自動車における水素貯蔵の開発状況

4 - 1

燃料電池自動車への水素の搭載

2002年12月2日にトヨタ自動車(株)と本田技研工業(株)が世界で初めて燃料電池乗用車を実用化させた^{5, 6)}。燃料はいずれも純水素(直接水素型)で最高充填圧力350気圧の圧縮水素ガスを高压水素タンクに貯蔵している。走行時の加速性能や静粛性が高く評価されているが、航続走行距離はそれぞれ300、355kmと短くガソリン乗用車には及ばない。パワーユニットの開発に比べて、燃料である水素の貯蔵技術の開発が後れをとっている感否めない。コストだけでなく水素貯蔵技術の開発が燃料電池自動車普及の鍵の一つになっていることは間違いない。

我が国における代表的な水素エネルギーのプロジェクトとしては、NEDOのWE-NETプロジェクトが知られている。第1期計画(1993～1998年度)は、水力、太陽光、風力等の再生可能エネルギーを利用して水から水素を製造し、水素を二次エネルギーの輸送・貯蔵媒体として利用し、世界的規模のクリーンエネルギーネットワークを構築しようとする壮大

な構想であった。水素貯蔵技術はWE-NET内のタスクで研究開発され、液体水素条件で利用できる構造材料や分散輸送・貯蔵用水素吸蔵合金等の開発が行われてきた。WE-NETは、1999年度からの第2期計画では、小型分散型の利用技術開発に重点をシフトし、特に2001年度からは燃料電池と一体となって開発を進めるプロジェクトに転換した。

水素貯蔵に関しては、国内では従来、高压ガスである水素タンクを自動車に積載することが規制されていたため、水素自動車の燃料搭載方式は当初水素吸蔵合金が主流で開発が進められてきた。WE-NET第2期では、水素自動車システムの周辺関連技術を対象に研究開発を実施しており、自動車用水素吸蔵合金、水素供給ステーション等を開発してきた。水素吸蔵合金に関しては、当初の開発目標であった有効水素吸蔵量3wt%に迫るものも見出されている¹⁸⁾が、それでも合金使用量100kgに対して燃料水素量は3kgで航続走行距離は300km程度と実用的には未だ不十分であった。2001年の経済産業省の燃料電池／水素エネルギー利用技術開発戦略において、水素自動車の燃料搭載システムの体積と重量の目標値は、現行のガソリ

ン車における燃料タンクと同程度と設定されたのを受け、2002年度よりWE-NET計画における水素吸蔵材料の水素吸蔵量の開発目標が5.5wt%へと変更された¹²⁾が、この目標を達成する材料の見通しは現段階では得られていない。

一方、2001年4月に自動車への水素タンクの積載が解禁されてからは、燃料電池自動車の燃料貯蔵方式は水素吸蔵合金から圧縮水素に方向転換され、燃料電池自動車の実用化がにわかに現実的になってきた。現在の水素タンクは繊維強化プラスチック複合容器で、最高圧力が350気圧に制限されているが、近い将来より軽量な高压容器が現実のものとなると思われる。

4 - 2

水素供給ステーションの実証試験

燃料電池実用化戦略研究会では2020年における燃料電池自動車の導入目標を、我が国の現在の乗用車保有台数の1/10に相当する500万台としているが、その場合必要となる水素供給ステーション設置数は3300ヶ所と試算されている²¹⁾。水素供給ステーションに関しては、WE-NETにおける水素利用技術の一つとして、2002年

度に国内に3ヶ所のステーションが設置されており、実用化に必要な試験研究等を行い、安全・設計等の技術指針を作成し、将来の水素供給ステーションの標準仕様策定につなげる計画になっている。各ステーションにおける水素の貯蔵方式は、大阪市と高松市にあるステーションでは何れも水素吸蔵合金と圧縮ガス方式、横浜市にあるステーションでは圧縮ガス方式を採用している。またこれらとは別に東邦ガス㈱が東海市に圧縮ガス方式の水素供給ステーションを建設し、エンジニアリング技術の検討と安全性の実証試験を行っている。

さらに2002年から開始された「水素・燃料電池実証プロジェクト^(注9)」では、国内初の大規模な燃料電池自動車実証走行研究を行い、水素の車載方法、性能・安全性に関する基礎的データ共有化な

どの課題に産学官が協力して組織的に取り組むことになっている。それと同時に、2002年度は首都圏で5ヶ所の水素供給設備を建設し、液体水素、高圧ガス等、複数の方式による水素供給設備を運用する計画になっている。図表5にプロジェクトで選定された5ヶ所の水素供給ステーションとそれぞれの水素供給方式を示す²²⁾。3年間の実証試験を通して、現実の使用条件での技術的な課題を明らかにすると共に、環境特性、エネルギー総合効率、燃料性状、安全性、耐久性などに関するデータを収集分析していく¹¹⁾。なお本プロジェクトには国内自動車メーカー（トヨタ、日産、ホンダ）だけでなく海外の自動車メーカー（GM、ダイムラー・クライスラー）も参加しており、協調と競争により燃料電池自動車開発が推進される。

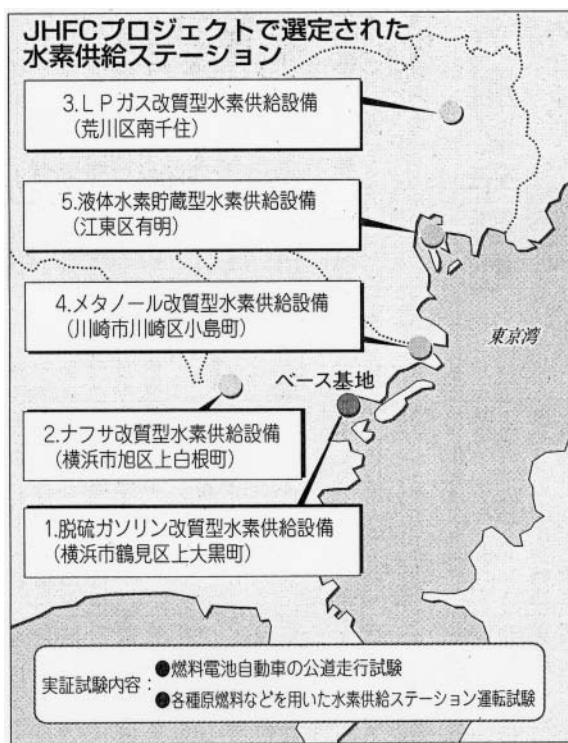
(注9) Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration Project (JHFCプロジェクト)。経済産業省の補助事業で「燃料電池自動車実証研究」と「燃料電池自動車用水素供給設備実証研究」から構成されるプロジェクト。実施期間は2002～2004年度。

4 - 3

水素の安全対策

水素の燃料への使用については安全性の担保が大前提である。WE-NETにおいても「安全対策に関する調査・研究」として専門のサブタスクを設けて、安全設計基準構築のための検討や、安全評価手法確立のための検討を行ってきた⁹⁾。水素供給ステーションにおける潜在的な事故事象を抽出し、特に水素貯蔵においてはタンクからの連続水素放出を代表事象に選定し、液体水素の流出、蒸発、拡散試験と、水素の爆発試験や、また高圧水素が漏洩した場合の漏洩形態と着火条件の関係を把握する実験等が実施されている。実験結果の検証解析によりシミュレーションモデルの確立も進められている。2003年度からの水素安全利用等基盤技術開発プロジェクトでは、安全とインフラを中心に基盤整備が行われる。これらの安全性に係るデータが蓄積され、関係諸機関で規制の再点検が行われることと考えられるが、試験データは積極的に公開されるべきである。水素に対する一般市民の不安を払拭し、理解と協力を得るためにも、WE-NETや水素・燃料電池実証プロジェクト等の成果が啓蒙活動の一環として、幅広く発信、共有化されることが望ましい。

図表5 水素・燃料電池実証プロジェクトで建設される水素供給ステーション



出典：文献²²⁾

5. 海外の状況

5 - 1

アメリカ

アメリカにおける水素エネルギー技術開発は1992年にDOE^(注10)のHydrogen Programが策定されてから本格的な開発が行われる様になった。1993年に開始された連邦政府による次世代自動車の技術開発であるPNGV (Partnership for a New Generation of Vehicles)の一部として、またカリフォルニア州におけるCaFCP (California Fuel Cell Partnership)を中心として行われてきた。特にCaFCPでは参加企業がダイムラー・クライスラー、フォード、日産、ホンダ、フォルクスワーゲン、韓国の現代、さらに2000年10月からのGM、トヨタと国際化したことが注目された。

(注10) 米国エネルギー省
(Department Of Energy)

2002年1月、米国政府はDOEの主導で、PNGVを発展的に解消し、新たにFreedom CAR (Freedom Cooperative Automotive Research Partnership)を開始すると発表した。米国政府とビッグスリー (フォード、GM、ダイムラー・クライスラー) との官民のパートナーシップによりリスクの高い技術開発、特に水素搭載型燃料電池自動車関連技術に重点を置き、要素技術の開発を行うものである⁴⁾。2003年1月には、ブッシュ大統領が一般教書演説でFreedom Fuel計画を発表し、燃料電池自動車の実用化を推進するため、必要な技術開発や社会インフラの整備に取り組むとしている。

またDOEのHydrogen Research Programでは、水素製造技術、水

素利用技術と並んで、水素の輸送・貯蔵技術に焦点を当て、自動車への搭載を念頭に貯蔵量6.5wt%をターゲットに圧縮ガスタンク、液体水素タンク、化学貯蔵、金属水素化物、炭素系材料への吸着等の研究を精力的に進めている²³⁾。またDOEでは、エネルギー効率・再生可能エネルギー部門、化石エネルギー部門、原子力部門等で行っている水素関係のプロジェクトを一体化した「DOE統合水素計画 (Integrated Hydrogen Program)」構想を作成中であり、2002年11月には「米国水素エネルギー・ロードマップ (The National Hydrogen Energy Roadmap)」を発表しており、燃料電池自動車と分散電源システムの導入による水素経済 (Hydrogen Economy) 社会実現への道程を示している²⁴⁾。その中では水素をクリーンエネルギーとしてだけでなく、エネルギー・セキュリティの観点からも捉えている。水素貯蔵に関しては、水素経済社会実現へのキー・テクノロジーと位置付けているが、現在の貯蔵技術は製造者、エンドユーザー何れにも不十分であり、低コスト化、特性向上、先端材料の開発に産官連携の研究開発が必要であるとしている。高圧水素ガスと液体水素を含む現状の商業的技術と、先端材料 (軽量金属水素化物とカーボンナノチューブ等) を含む実現がより難しい貯蔵技術の探索に注力すべきと指摘している。

5 - 2

ヨーロッパ

一方、ヨーロッパでは、欧州委員会の支援を受け燃料電池バスの実証試験プログラムの実施を多くの国が表明している。アイスラン

ドのECTOS (Ecological City Transport System)²⁵⁾ 及びドイツ、イギリス等7カ国によるCUTE (Clean Urban Transport for Europe)²⁶⁾ において計30台の圧縮水素搭載型燃料電池バス (ダイムラー・クライスラー社製) が10都市^(注11)に導入される予定で、2003年からのフリートテスト開始が計画されている⁴⁾。特にECTOSはアイスランド全体を世界初の水素社会に転換していくプロジェクト^(注12)として、水素エネルギー社会への挑戦のモデルケースとして注目される。アイスランドは水力・地熱などの再生可能エネルギー資源に恵まれており、これらの資源を利用して水素を製造し、20~30年以内に化石燃料の使用を完全にゼロにし、水素社会への転換を図ろうというものである。まずは首都レイキャビクで、水素供給ステーションのインフラを整備し水素燃料電池バス3台を通常の都市交通に供用し、その後マイカーや、アイスランドの主要産業である漁業向けに漁船の動力にも応用していく計画である。さらにアイスランドからEU諸国に向けて再生可能エネルギーで作られた水素の輸出も視野に入れて検討されている。

(注11) ECTOS：アイスランド (レイキャビク)、CUTE：オランダ (アムステルダム)、スペイン (マドリッド、バルセロナ)、ドイツ (ハンブルグ、シュツットガルト)、イギリス (ロンドン)、ルクセンブルグ、ポルトガル (ポルト)、スウェーデン (ストックホルム) の計10都市で公共交通用に水素燃料電池バスが導入される。

(注12) ECTOS実施のために設立されたIcelandic New Energy

社のホームページでは、The mission of Icelandic New Energy is to "investigate the potential for eventually replacing the use of fossil fuels in Iceland with hydrogen and create the world's first hydrogen economy".と宣言されている。

またドイツでは、1995年よりミュンヘン国際空港内で使用するバスや小型車などを水素自動車に切り替える「ミュンヘン空港水素プロジェクト」計画を発足させている。高圧水素を搭載するバス3台と液体水素を搭載する乗用車が空港内で運用されている²⁷⁾。本プロジェクトでは、世界で初めてフリート向けの水素の製造や貯蔵のみならず、水素供給の完全自動化まで行い安全性等を検証している。

一方民間ではダイムラー・クライスラー社が1990年以来燃料電池自動車の開発を継続している。1997年に初めて公道で走らせた燃

料電池バスNEBUSは水素タンク方式で航続距離250kmであったが、1999年に開発した燃料電池乗用車NECAR 4では液体水素方式を採用して航続距離450kmを達成している。同社ではこの他にもメタノールを燃料として、車載改質器で水素を製造する方式のNECAR 5等も開発しているが、2002年末から2003年にかけて限定発売するバスや乗用車には高圧水素タンクを載せる予定である²⁸⁾。

5 - 3

国際標準化

このように国際的な活動の中で、国際標準化に関する動きにも留意が必要である。自動車は国境を越えた国際商品であるので、水素燃料電池自動車にも標準圧力など国際的な規制や標準化が適用されることが予想される。ディスプレイや水素充填コネクタ等の周辺技術も、開発に先行した国が

デファクトスタンダードとして自国の規格を国際標準化しようとする動きがある。燃料電池に関しては、ISO^(注13)及びIEC^(注14)の場において欧米各国が積極的に国際標準化の議論を進めている⁴⁾。水素貯蔵技術の国際標準について、我が国がより積極的に発言するためには、議論の場で具体的な情報(データ)に基づく技術論を展開することが必要となるので、WE-NETや水素・燃料電池実証プロジェクト等の成果のより積極的な活用が望まれる。関係機関が協調して規制制度の整備、標準化を検討していく必要がある。

(注13) 国際標準化機構

(International Organization for Standardization)

(注14) 国際電気標準会議

(International Electrotechnical Commission)

6. おわりに

水素燃料電池自動車の技術実証段階における水素貯蔵は、天然ガス自動車で実績のある高圧タンク方式でスタートした。大型バス等スペースに余裕のある場合には、屋根又は床下に数多くの水素タンクを積めるため、重量や空間的制約は少ないが、車内スペースの限られた乗用車では現状の350気圧の水素タンクの貯蔵量では不十分といわざるを得ない。一方、水素吸蔵合金はコンパクトではあるが重量が重くなり、また液体水素は空間に対する制限は小さく軽量化が図れるものの、ハンドリングが複雑で液化工程でもエネルギーを消費してしまうという様に、何れの方法にも一長一短があり技術開発に残された課題は多い。車載での水素貯蔵に関してはまだまだ解決しなければならない問題が残さ

れており、最終的な解は得られていない。革新的な材料の研究開発に残された余地は大きいといえる。

水素燃料電池自動車が現実のものとなった今日、さらに高い能力を有する水素貯蔵材料の開発は急務である。燃料電池自動車同様、水素貯蔵材料も協調と競争によって開発されていくことが望まれる。従来、素材分野毎に進められていた材料開発が、水素エネルギー社会実現という共通目標と、そのためのタイムスケジュールを共有した上で協調・競争することが望まれる。水素エネルギーに関連する複数のプロジェクトを俯瞰し、全体としての総合力を発揮させる上で国の果たす役割も大きい。優れた貯蔵特性を有する軽量コンパクトな水素貯蔵材料が開発され、究極のクリーンカー普及の

ための礎が築かれることが期待される。

自動車産業は裾野産業への波及効果が大きい総合産業であり、グローバルマーケットにおける生産規模や経済効果も大きい。燃料電池自動車は、我が国が世界をリードする技術競争力を有する分野の一つである。我が国が燃料電池自動車開発で世界のリーダーシップをとることは、日本が地球環境保全の先頭に立って国際貢献するというだけでなく、日本の産業競争力を維持発展させる上でも大きな意義がある。

水素エネルギー社会を実現させていくためには、長期的ビジョンとして再生可能エネルギーを起点とした究極のクリーンエネルギーシステムの姿が必要であるが、一方、水素エネルギーが社会に受容

され浸透普及していくためには戦略的な中間シナリオも不可欠である。化石エネルギーの有効利用も含めた現実的な導入促進策と啓蒙活動により社会的受容性の醸成、規制制度の整備、標準化等を進めていくべきである。

謝辞

本稿をまとめるに当たり、筑波大学名誉教授・燃料電池開発情報センターの本間琢也常任理事、東京理科大学工学部工業化学科の斉藤泰和教授、水素エネルギー協会の岡野一清理事、日本電動車両協会の丹下昭二燃料電池センター長には、ご指導をいただくと共に、有益な情報をご提供いただきました。ここに深甚な感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 大森良太、「化石資源を用いない水素製造技術」、科学技術動向 2002年10月号
- 2) 大角泰章、クリーンエネルギー・水素、アグネ技術センター (1992.7)
- 3) 大角泰章、水素エネルギー利用技術、アグネ技術センター (2002.5)
- 4) 燃料電池プロジェクトチーム報告書 (2002.5) http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha02/01/010527_.html
- 5) 例えば、トヨタ自動車株式会社ホームページ http://www.toyota.co.jp/News/2002/Nov/nt02_1104.html
- 6) 例えば、ホンダ技研工業ホームページ <http://www.honda.co.jp/news/2002/4021122-fcx.html>
- 7) 例えば、ダイムラー・クライスラー日本ホールディング株式会社ホームページ http://www.daimlerchrysler.co.jp/index_j.html
- 8) 例えば、日本ゼネラルモーター株式会社ホームページ <http://www.gm-japan.co.jp/>
- 9) WE-NET ホームページ <http://www.ena.or.jp/WE-NET/>
- 10) 鉄鋼新聞、2002年8月12日
- 11) 「水素・燃料電池実証プロジェクト」ホームページ <http://www.jhfc.jp/fcv400/fcv401.html>
- 12) 秋葉悦男、「高密度水素貯蔵技術の開発状況と展望」、水素エネルギー社会の実現へ、MH利用開発研究会平成14年度特別講演会予稿集 (2002.10)
- 13) 岡野一清、「水素エネルギーシステムの実証：国内外の動向」、エネルギー・資源、Vol.23, No.5 (2002)
- 14) A. C. Dillon et al., Nature, 386, 377 (1997)
- 15) A. Chambers et al., J. Phys. Chem. B, 102, 4253 (1998)
- 16) C. C. Ahn et al., Appl. Phys. Lett., 73, 3378 (1998)
- 17) S. Orimo et al., J. Appl. Phys., 90, 1545 (2001)
- 18) 栗山信宏、「水素貯蔵材料技術の現状と展望」、エネルギー・資源学会「平成14年度エネルギー特別講座」予稿集 (2002.11)
- 19) Borislav Bogdanovič et al., MRS BULLETIN, 27, 712 (2002)
- 20) 須田精二郎、「多様な用途が期待される液体水素化物」、第17回「大学と科学」公開シンポジウム「21世紀を拓く水素の世界」予稿集 (2002.10)
- 21) 小林紀、「水素導入シナリオ」、エネルギー・資源学会「平成14年度エネルギー特別講座」予稿集 (2002.11)
- 22) 日本工業新聞、2003年1月21日
- 23) DOE Hydrogen Research Program ホームページ <http://www.eren.doe.gov/hydrogen/research.html>
- 24) DOE Hydrogen Research Program ホームページ http://www.eren.doe.gov/hydrogen/pdfs/national_h2_roadmap.pdf
- 25) Ecological City Transport System ホームページ <http://www.newenergy.is/ectos.asp>
- 26) Clean Urban Transport for Europe ホームページ http://europa.eu.int/comm/energy_transport/en/prog_cut_en.html
- 27) The Hydrogen Project at Munich International Airport ホームページ <http://www.hyweb.de/h2muc/introe.html>
- 28) 青木慎一、日経サイエンス 2003年1月号

.....

特集③

2004年度米国大統領予算教書に見る
R&D プライオリティの変化

客員研究官 清貞 智会



1. はじめに

2003年2月3日、Bush米大統領が2004年度（2003年10月～2004年9月）の予算教書を発表した。連邦政府全体のR&D予算は1227億ドル、対前年比6.7%増である。

この増加率は、2004年度の裁量予算（連邦政府の全予算から義務的経費を除いたもの）の増加率（4%）を上回っている。これにはディフェンス関連の開発予算とホームラ

ンドセキュリティ関連の研究予算が大幅に伸びた影響が大きい。本稿では2004年度大統領予算教書をもとに、Bush政権のR&Dプライオリティ変化について議論する。

2. Bush政権を取り巻く環境

2004年度大統領予算教書は、不確定な要因が山積した中で発表された。まず、2003年度（2002年10月～2003年9月）がスタートして既に4ヶ月が経つが、歳出法案が可決されたのはDODのみで、他省局の予算はまだ議会審議が続いている^(注1)。もしイラク戦争が起これば臨時予算が必要となり、2002年度から続く財政赤字を拡大するであろう。そして最も不確定

な要因が、今後の科学技術政策に及ぼすスペースシャトル事故の影響である。事故が起きたのは予算教書がリリースされる2日前で、その時すでに各省の予算要求案が確定していたため、2004年度の予算教書は事故の影響を受けていない。以上から、大統領予算教書が議会審議を経て歳出予算法となる頃にはどれほど原案を留めているか予測困難であるが、昨年秋の連

邦議会で上院、下院ともに大統領が支持する共和党が多数派となっているため、議会は大統領案を重視すると考えられる。

（注1）本稿では2003年度予算として、DODは予算歳出法に基づく値を、その他機関では大統領予算教書で提示された値を用いる。

3. 2004年度予算の概要

図表1に2004年度R&D予算（大統領案）の内訳を、図表2に2004年度予算（大統領案）の対前年増加率を示す。Bush政権のディフェンス重視路線に沿ってDODが大きく伸びているが、この内訳を見ると、ミサイル防衛開発プログラム^(注2)等の武器システム開発予算が大幅に増加している一方、基礎研究は7.7%減、応用研究は14.4%減となっている。

（注2）2004年度大統領予算教書ではミサイル防衛開発プログラ

ムが対前年比22%増の83億ドル。

NSFのR&D予算は対前年比10%増となっているが、これは昨年12月に正式決定されたNSFの予算倍増キャンペーン（2003～2007年度）に必要な年率15%の増加率より小さい。

NASAの予算はスペースシャトル事故が起こる前に提案されたが、全NASA予算の3分の2を占めるR&D予算が9.3%増となっている。これは太陽系探査等のスペースサイエンスプログラムの予算

が大幅に増えたためであるが、スペースシャトル事故によりNASAのプログラムの抜本的な見直しが進むと考えられ、行方が見守られる。

NIHのR&D予算はこれまで倍増キャンペーン（1999～2003年度）により順調に伸びてきたが、2004年度はキャンペーン終了にともなって増加率が2%に留まった。インフレ率（1.9%）を考慮すれば、実質的に2004年度予算は前年度並みとなる。ただし、NIHは2003年度に単年度限りの設備投資を大規模に行った^(注3)ため、2004

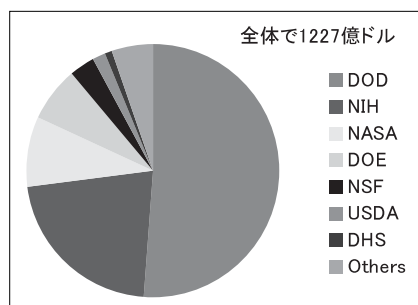
年度のR&Dプログラム予算は実質3～5%増となる。

(注3) NIHの設備投資予算として2003年度は\$769Mが要求された、2004年度は\$80Mとなっている。

新設されたばかりのDHSのR&D予算は対前年比31.5%増となっており、これは2004年からスタートするHSARPA (Homeland Security Advanced Research Projects Agency) (注4) の予算が新規計上された影響が大きい。

(注4) DODのDARPA (Defense Advanced Research Program Agency) をモデルとするファンディング機関。Directorate of Science and Technology (DHS) に設置。

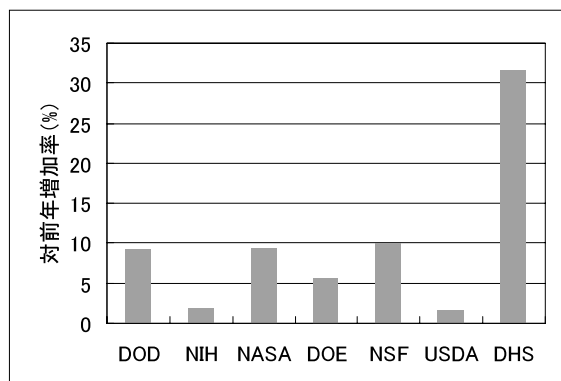
図表1 2004年度予算（大統領案）の内訳の目標



* DOD: Department of Defense, NIH: National Institute of Health, NASA: National Aeronautics and Space Administration, DOE: Department of Energy, NSF: National Science Foundation, USDA: United State Department of Agriculture, DHS: Department of Homeland Security

(sources) AAAS Preliminary Analysis based on OMB data for R&D for FY 2004 を元に作成

図表2 2004年度予算（大統領案）の対前年増加率



(sources) AAAS Preliminary Analysis based on OMB data for R&D for FY 2004 を元に作成

4. ライフサイエンスから物理へとプライオリティ変化のきざし

図表3に分野別政府R&D予算の経年変化を示す。

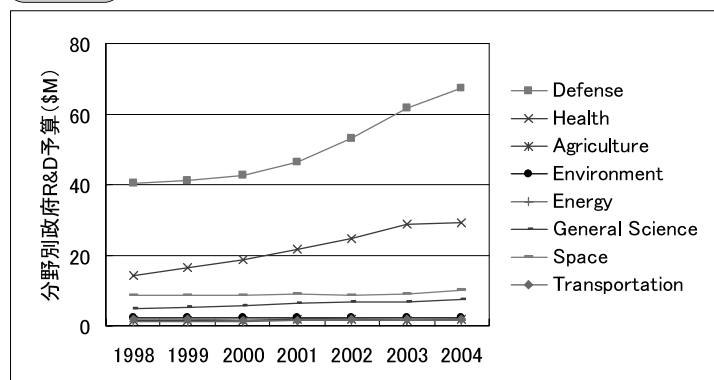
NIH予算倍増キャンペーンによりNIHの予算が大幅に伸びた結果、分野間の予算配分のアンバランスが問題になっている。ところが、2004年度大統領予算教書は、

ライフサイエンス重視から数学・物理重視へと変化している。例えば、NIHが微増となる一方、大部分が数学、物理、コンピュータサイエンス等のプログラムへ配分されるDOEの研究 (注5) 予算は8.1%増え、またNSFのDirectorate of

Mathematical and Physical Sciencesは12.7%となっている。

(注5) DOEは数学・物理研究において連邦政府最大のスポンサー

図表3 分野別政府R&D予算の変化



(sources) AAAS Preliminary Analysis based on OMB data for R&D for FY 2004, AAAS Report: Research and Development FY 2003, FY2002, FY2001, FY2000, Fy1999, FY1998 を元に作成。

5. おわりに

イラク情勢が緊迫の度を増す中で発表された2004年度大統領予算教書では、ディフェンス開発予算が大幅に伸び、ミサイル防衛開発プログラムだけを取っても対前年比22%増の83億ドルとなっている。これはDOE全体のR&D予算にほぼ匹敵し、さらにNSF全体のR&D予算をはるかに凌ぐ。一方、NSFは2ヶ月前に予算倍増(2003～2007)が正式決定されたにもかかわらず、予算教書では倍増トラックに沿った増加率(15%)

を満たしていない。また、昨年度までのライフサイエンス分野から数学・物理分野へとプライオリティが変化していることも2004年度予算教書の特徴である。

今後、大統領予算教書は議会へ送られる。議会にはNSF倍増キャンペーンのサポーターが多い。また、一般的に市民は数学や物理よりもライフサイエンスに関心を示すため、多くの議員が再びライフサイエンス重視を支持する可能性が高い。以上から歳出予算法案

が可決されるまでには様々な衝突が起こると予想されるが、まずは2003年度の予算を確定することが先決である。

謝辞

本稿をまとめるにあたり、多大なるご協力をいただいたAAAS R&D Budget and Policy ProgramのKoizumiディレクターに感謝の意を表します。

.....

科学技術動向センターとは

平成13年1月より内閣府総合科学技術会議が設置され、従来以上に戦略性を重視する政策立案が検討されています。科学技術政策研究所では、戦略策定に不可欠な重要科学技術分野の動向に関する調査・分析機能を充実・強化するため1月より新たに「科学技術動向研究センター」を設立いたしました。本センターでは、第2期「科学技術基本計画」に示されたライフサイエンス、情報通信等の重点分野の最新動向に係る情報の収集や今後の方向性についての調査・研究に、下図に示すような体制で取り組んでいます。

センターがとりまとめた成果は、適宜、総合科学技術会議、文部科学省へ政策立案に資する資料として提供いたします。

センターの具体的な活動は以下の3つです。

1

「科学技術専門家ネットワーク」による科学技術動向分析

わが国の産学官の研究者を「専門調査員」に委嘱して（2002年度実績約2800人）、インターネットを利用して科学技術動向に関する幅広い情報を収集・分析する体制「科学技術専門家ネットワーク」をより運営しています。このネットワークを通じ、専門調査員より国内外の学会会合、学術雑誌などで発表される研究成果、注目すべき動向や今後の科学技術の方向性等に関する意見等を広く収集いたします。

これらの情報に、センターが独自に行う調査・研究の結果を加

え、毎月1回、「科学技術動向」としてまとめ、総合科学技術会議、文部科学省を始めとした科学技術関係機関等に配布いたします。なお、この資料は<http://www.nistep.go.jp>において公開します。

2

重要科学技術分野・領域の動向の調査研究

今後、国として取り組むべき重点事項、具体的な研究開発課題等を明確にすることを目的とし、重要な科学技術分野・領域に関するキーテクノロジー等を調査・分析します。

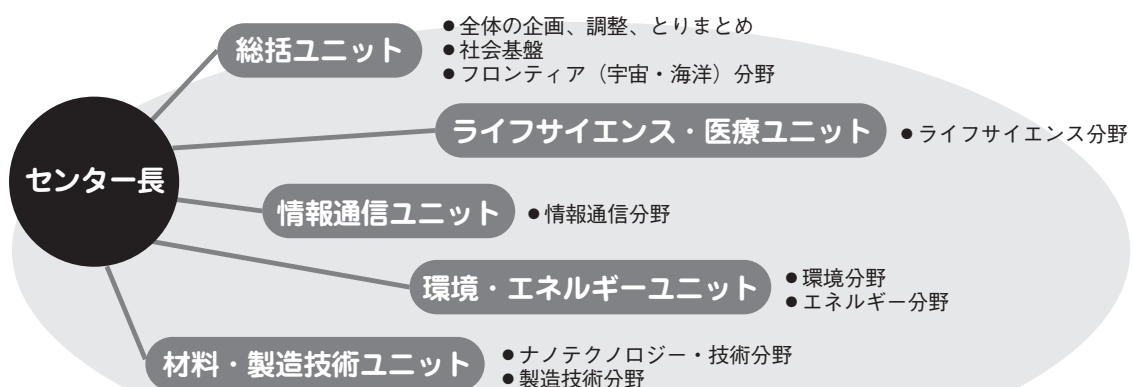
さらに、重要な科学技術分野・領域ごとの科学技術水準を欧米先

進国と比較し、わが国の科学技術がどのような位置にあるのかについての調査・分析も行います。

3

技術予測に関する調査研究

当研究所では、科学技術の長期的将来動向を総合的に把握するため、デルファイ法による技術予測調査をほぼ5年ごとに実施しています。これは、今後30年間の重要技術を抽出して、重要技術の重要性評価や実現予測時期を分析するものであり、センターは、多くの専門家の協力により本調査を引き続き実施いたします。



*それぞれのユニットには、職員その他、客員研究官（非常勤職員）を配置。

*センターの組織、担当分野などは適宜見直しを行う。

SCIENCE & TECHNOLOGY TRENDS

February 2003
(NO.23)

Science & Technology Foresight Center

National Institute of Science and
Technology Policy (NISTEP)
Ministry of Education, Culture, Sports,
Science and Technology

※このレポートについてのご意見、お問い合わせは、下記のメールアドレスまたは電話番号までお願いいたします

なお、科学技術動向のバックナンバーは、下記の URL にアクセスいただき「報告書一覧 科学技術動向・月報」でご覧いただけます。

文部科学省科学技術政策研究所 科学技術動向研究センター

連絡先：〒100-0013 東京都千代田区霞が関1-3-2
電話 03-3581-0605 FAX 03-3503-3996
URL <http://www.nistep.go.jp>
Email stfc@nistep.go.jp

- ▶ Life Sciences
- ▶ Information & Communication Technologies
- ▶ Environmental Sciences
- ▶ Nanotechnology & Materials
- ▶ Energy
- ▶ Manufacturing Technology
- ▶ Infrastructure
- ▶ Frontier